

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELLE MAIA BONATO

**DESEMPENHO MECÂNICO E AMBIENTAL DE CONCRETOS E
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND COM SUBSTÂNCIAS MINERAIS,
ORGÂNICAS E FOTOCATALÍTICAS**

**Curitiba
2014**

MARCELLE MAIA BONATO

**DESEMPENHO MECÂNICO E AMBIENTAL DE CONCRETOS E
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND COM SUBSTÂNCIAS MINERAIS,
ORGÂNICAS E FOTOCATALÍTICAS**

**Tese apresentada como requisito parcial à
obtenção de grau de Doutor. Área de
concentração: Engenharia e Ciência dos
Materiais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná.**

Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella

Curitiba

2014

Bonato, Marcelle Maia

Desempenho mecânico e ambiental de concretos e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas / Marcelle Maia Bonato. – Curitiba, 2014.

189 f. : il.; tabs., grafs.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - PIPE.

Orientador: Kleber Franke Portella

Bibliografia: p. 177-189

1. Fotocatalise. 2. Concreto - Mistura. 3. Ar- Poluição. I. Portella, Kleber Franke. II. Título.

CDD 628.162




UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais
Setor de Tecnologia

RELATÓRIO DE DEFESA DE TESE DE DOUTORADO

Aos trinta dias do mês de outubro de 2014, no Auditório do CESEC - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a seragésima quarta defesa de tese de doutorado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Kleber Franke Portella (UFPR), Marcelo Henrique Farias de Medeiros, (UFPR), Washington Luiz Esteves Magalhães (UFPR), Almir Sales (UFSCar), Sínei Antônio Pianaro (UEPG). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata MARCELLE MAIA BONATO a fazer a apresentação da tese de doutorado intitulada “DESEMPENHO MECÂNICO E AMBIENTAL DE CONCRETOS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND COM SUBSTÂNCIAS MINERAIS, ORGÂNICAS E FOTOCATALÍTICAS.” Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a tese e a arguição, a banca decidiu pela Aprovação do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 30 de outubro de 2014.


Prof. Dr. Kleber Franke Portella
Orientador


Prof. Dr. Marcelo H. Farias de Medeiros
Examinador


Prof. Dr. Washington Luiz E. Magalhães
Examinador


Prof. Dr. Almir Sales
Examinador


Prof. Dr. Sínei Antônio Pianaro
Examinador


Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. d'Oliveira
Coordenadora do PIPE

Ao meu eterno amigo,

Meu grande herói ...

AGRADECIMENTOS

À minha família: em especial aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional de sempre. Ao meu amor: pela compreensão das horas roubadas, pela cumplicidade, carinho e companheirismo. Aos meus príncipes: onde encontro a inocência, a alegria e a energia de quem quer o mundo em poucos segundos, obrigada por fazerem o mundo mais feliz. Aos meus irmãos: Marcel por todo o incentivo e carinho; e Claudinei, o meu protetor, mesmo de tão longe. À minha cunhada Roberta, pelo apoio, e por dividir estes momentos com tanta alegria.

À Deus, por toda a força, fé e saúde. Obrigada por me fazer encontrar a razão para viver, todos os dias.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Kleber Franke Portella, pela orientação, ensinamentos, confiança e paciência, bem como por toda a atenção dispensada a mim no decorrer deste trabalho.

À grande Mariana, pelos cafés com ciência e outras discussões, pelas palavras de apoio, incentivo e amizade nos momentos mais difíceis, e nos outros também.

Ao colega Walderson, pela colaboração, atenção e dedicação na parte experimental da cinza de coco.

Aos colegas do LAME, LAC e CEHPAR, pela colaboração prestada nos ensaios, dosagens e análises realizadas no transcorrer da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora, meus agradecimentos pela colaboração para o aperfeiçoamento dos temas da tese.

Enfim, esta pesquisa não teria sido realizada sem a participação direta e indireta de diversos profissionais da COELBA, da AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA e CNPq/PIBITI/Bolsa PQ/Lei 8010/90.

RESUMO

Um dos grandes problemas da sociedade moderna é a poluição do meio ambiente, seja pelo elevado volume de cimento produzido e consumido diariamente, pelos gases poluentes oriundos de veículos automotores e até mesmo pela quantidade de resíduos depositados a céu aberto por falta de reuso. Diante disto, tem-se uma constante busca por novos métodos e materiais sustentáveis, a fim de reduzir e/ou eliminar este impacto ambiental. Entre as técnicas promissoras, que permite a decomposição de poluentes orgânicos e inorgânicos e os transforma em substâncias menos agressivas e sais minerais, tem-se a fotocatalise. Outra possibilidade é a utilização de resíduos, assim como matéria-prima de baixo valor agregado e de grande volume no Brasil, na produção de concretos, propiciando a redução do consumo de cimento, e portanto, diminuindo a geração de gases poluentes. Assim, esta pesquisa está dividida em duas metodologias: desenvolvimento de misturas cimentícias com adições minerais do tipo cinza da casca de coco verde (CC) e adições orgânicas de fibras de coco (FC) e de sisal (FS) e, também, o desenvolvimento de aparato para a verificação da eficiência fotocatalítica em argamassas produzidas com nano-dióxido de titânio (TiO_2) em diferentes teores. A metodologia empregada para verificar a viabilidade de utilização dos insumos em artefatos de concreto para redes de distribuição de energia em área litorânea e industrial foi: a caracterização da matéria-prima e das misturas cimentícias, como desempenho mecânico à compressão axial, à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático, propriedades físicas, permeabilidade, durabilidade, microestrutura pós ruptura dos CPs (corpos de prova) envelhecidos e da armadura, além da perda de espessura da armadura. Para o acompanhamento da durabilidade, os CPs de concreto foram envelhecidos em câmaras de intemperismo acelerado, submetidos a ciclos de molhagem e secagem a temperaturas de até 40 °C em atmosfera agressiva de névoa salina e gás anidrido sulfuroso, que simularam condições do meio industrial e marinho. Para uma análise comparativa, alguns CPs foram acondicionados em dessecador, tornando-se esta condição como referência. A durabilidade foi avaliada pela técnica de potencial de corrosão da armadura em equipamento potenciostato/galvanostato ao longo de mais de 550 dias. Não houve diferença significativa nos potenciais obtidos para as diferentes dosagens. Os resultados obtidos indicaram uma alta probabilidade de corrosão para a atmosfera salina e, também, para o sulfato; no entanto, estes valores foram menos eletronegativos. Quanto às adições de FC, FS e CC, os resultados obtidos indicaram que é possível utilizá-las como insumos na produção de concretos e/ou argamassas, propiciando a redução do custo final de artefatos e de impactos ambientais. A redução do cimento, principal colaborador no custo do concreto e poluição ambiental, quando da utilização das melhores dosagens, atingiu valores de 4,3 e de 1,7%, respectivamente, para as FC e FS; e de 3,3% para a CC. Já o potencial fotocatalítico das argamassas com TiO_2 foi analisado pela redução na concentração dos gases NO_x e SO_2 em uma câmara com ação ultravioleta. Os dados obtidos comprovaram uma oxidação entre 30 e 40% na concentração de NO_x e de 28 a 43% para o SO_2 , demonstrando ser também uma alternativa para a despoluição do ar.

Palavras-chave: fotocatalise, concreto com fibras de coco e sisal, potencial de corrosão, cloreto e sulfato, poluição atmosférica

ABSTRACT

A major problem of modern society is the pollution of the environment, due to the high volume of cement produced and consumed daily by gaseous pollutants come from motor vehicles and even the amount of waste deposited in the open for lack of reuse. This, there is a constant search for new sustainable methods and materials in order to reduce and/or eliminate this environmental impact. Among the promising techniques that allows the decomposition of organic and inorganic pollutants transforming them into less harmful substances and minerals has photocatalysis. Another possibility is the use of waste as raw material of low value and high volume in Brazil, in the production of concrete, leading to reduction in cement consumption, and thus reducing the generation of greenhouse gases. Thus, this research is divided into two methodologies: development of cement mixtures with mineral additions kind of coconut husk ash (CC) and organic additions of coconut fibers (FC) and sisal (FS), and also development of supply physical to check photocatalytic efficiency of mortars produced with nano-titanium dioxide (TiO_2) in different percentages. The methodology used to verify the feasibility of using the inputs into concrete artifacts for power distribution networks in marine and industrial area was: characterization of the raw material and mixtures by cement such as mechanical performance to axial compression, tensile strength by diametrical compression and static modulus of elasticity, physical properties, permeability, durability, microstructure after rupture of CPs and the armor, and the loss of thickness of the armor. To monitor the durability of concrete CPs were aged in accelerated weathering chambers, subjected to cycles of wetting and drying at temperatures up to 40 °C in an atmosphere of aggressive salt spray and sulfur dioxide gas, which simulated conditions of the industrial environment and marine. For a comparative analysis were placed CPs in a desiccator, becoming this condition as a reference. The durability was evaluated by the technique of the corrosion potential of the armor in a potentiostat /galvanostat equipment over more than 550 days. There was no significant difference in the potential obtained for the different dosages. The results indicated a high probability for corrosion in the salt atmosphere and also to sulfate; however, these values were less electronegative. As the additions of FC, FS and CC, the results indicated that it is possible to use them as inputs in the production of concrete and/or mortars, leading to reduction in the final cost of artifacts and environmental impacts. The reduction of the cement, the main contributor to the cost of concrete and environmental pollution when the use of best dosages, reached values of 4.3 and 1.7%, respectively for FC and FS; and 3.3% for CC. The photocatalytic potential of TiO_2 mortars was analyzed by the reduction in NO_x and SO_2 gases in a chamber with ultraviolet action. The data obtained proved degradation between 30 and 40% in NO_x and 28-43% for SO_2 , demonstrating also be an alternative to clean air.

Key-words: photocatalysis, concrete with sisal and coconut fibers, corrosion potential, chloride and sulfate, air pollution

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	A) CURVAS CARGA-DEFLEXÃO TÍPICAS DO CONCRETO CONVENCIONAL E DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS, B) DESENHO ESQUEMÁTICO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO APÓS FRATURA	38
FIGURA 2 –	FRUTA DO COQUEIRO E SUAS PARTES (AMBIENTE BRASIL, 2014)	43
FIGURA 3 –	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA PARTÍCULA DE UM SEMICONDUTOR NO PROCESSO DE FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA (ADAPTADO DE LACEY & SCHIRMER, 2008 APUD MELO, 2011).....	48
FIGURA 4 –	ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO: REGIÕES E COMPRIMENTOS DE ONDA (DORNELLES, 2008).....	49
FIGURA 5 –	FOTOS ILUSTRATIVAS: a) DA MÁQUINA DE CORTE DAS FIBRAS, b) DAS FIBRAS NATURAIS DE COCO; e c) DAS FIBRAS NATURAIS DE SISAL.....	57
FIGURA 6 -	SISTEMA DE ANÁLISE UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL FOTOCATALÍTICO DO TiO_2 FRENTE AOS GASES NO e SO_2	61
FIGURA 7 –	APARATO UTILIZADO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO, CONTENDO CAIXA DE AREIA, TUBO DE PVC E ESFERA METÁLICA LIGADA A UM CORDÃO COM ROLDANA.	64
FIGURA 8 –	A) DESENHO ESQUEMÁTICO DO CP PRISMÁTICO PARA O ENSAIO DE DURABILIDADE; B) DETALHE INTERNO DAS BARRAS COM AS DIMENSÕES DE EXPOSIÇÃO EM MILÍMETROS.....	65
FIGURA 9 -	FOTOS ILUSTRATIVAS DAS CÂMARAS DE INTEMPERISMO ARTIFICIAL: a) CÂMARA COM GÁS ANIDRIDO SULFUROSO (SO_2); E b) CÂMARA DE NÉVOA SALINA CÍCLICA.....	66
FIGURA 10 –	FOTO ILUSTRATIVA DO PROCESSO DE MEDIDA ELETROQUÍMICA NO AUTOLAB, COM O CP DE CONCRETO, A BARRA METÁLICA (ET), O CONTRA ELETRODO DE GRAFITE (CE) E O ELETRODO DE REFERÊNCIA (CSE)	67
FIGURA 11 -	FOTO ILUSTRATIVA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA PARA CPS DE CONCRETO.....	69
FIGURA 12 -	CPs DE ARGAMASSA PARA TESTES FOTOCATALÍTICOS EM PROCESSO DE CURA INICIAL: a) SEM TiO_2 ; b) COM 70% TiO_2 (E COBERTURA DE FILME PLÁSTICO).....	70
FIGURA 13 –	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	73
FIGURA 14 –	DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO PASSANTE NA # 2,4 MM	74

FIGURA 15 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO RETIDO NA # 2,4 MM	75
FIGURA 16 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO	76
FIGURA 17 – IMAGEM DA FIBRA DE SISAL OBTIDA POR SEM COM AMPLIAÇÃO DE 120X	78
FIGURA 18 – IMAGENS DA FIBRA DE COCO EM SEM COM AMPLIAÇÃO DE 350X: (A) SEM TRATAMENTO ALCALINO; (B) COM TRATAMENTO ALCALINO EM SOLUÇÃO DE 1% DE NaOH.....	78
FIGURA 19 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA CC CALCINADA A 900 °C.....	80
FIGURA 20 – ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS DE CC CALCINADAS A: (A) 550 °C; (B) 900 °C	80
FIGURA 21 - CINZA DA CASCA DE COCO VERDE (a) APÓS QUEIMA DE 550 °C EM FORNO ELÉTRICO POR 6 H; (b) APÓS A CALCINAÇÃO DE 900 °C EM MUFLA POR 1 H	81
FIGURA 22 – IMAGEM DA CC OBTIDA POR SEM COM AUMENTO DE 350X.....	82
FIGURA 23 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA AMOSTRA TiO ₂ , COM IDENTIFICAÇÃO DA FASE PREDOMINANTE ANATÁSIO	82
FIGURA 24 – ANÁLISE DA AMOSTRA NANO-TiO ₂ : (A) MICROGRAFIA POR SEM PARA VISUALIZAÇÃO DO TAMANHO DO CRISTALITO; (B) IMAGEM POR EDS PARA A IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS ELEMENTARES	83
FIGURA 25 - PICO DE DIFRAÇÃO DE MAIOR INTENSIDADE DO DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA AMOSTRA TiO ₂ PARA O CÁLCULO DO TAMANHO DO CRISTALITO, CONSIDERANDO $B_{1/2} = 0,18^\circ$ (0,007679 rad.) E $\theta = 12,66$	83
FIGURA 26 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FC (0,6; 0,8 e 1,0%)	85
FIGURA 27 - GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FC (0,6; 0,8 e 1,0%) AOS 28 DIAS DE CURA.....	86
FIGURA 28 - GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FC (0,6; 0,8 E 1,0%), COMPARATIVAMENTE AO CONCRETO REF	87
FIGURA 29 - GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FC AOS 28 DIAS DE CURA, QUANDO DO SURGIMENTO DA PRIMEIRA FISSURA E DA RUPTURA DO CP	89
FIGURA 30 – IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO REF DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO: (A) AMASSAMENTO; (B) DESPLACAMENTO; (C) FISSURAS; E (D) RUPTURA	90

FIGURA 31 –	IMAGEM DE CP DE CONCRETO COM 0,8% FC APÓS ENSAIO DE IMPACTO, APRESENTANDO FISSURA DE 1,0 MM: (A) VISTA SUPERIOR; (B) DETALHE LATERAL DA FISSURA	91
FIGURA 32 -	MICROGRAFIAS DE CP DE CONCRETO COM 0,8% FC, APRESENTANDO FISSURAS APÓS ENSAIO DE IMPACTO: (A) FC DISTRIBUÍDAS ALEATORIAMENTE COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DAS FIBRAS: UMA INTACTA E OUTRA COM RUPTURA COM AUMENTO DE 40X	92
FIGURA 33 –	IMAGEM DE FIBRAS DE COCO OBTIDA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO COM AUMENTO DE 20X, APRESENTANDO ESPESSURA E COMPRIMENTO VARIADOS. OBS. EM VIRTUDE DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DO EQUIPAMENTO, AS MEDIDAS ESTÃO APRESENTADAS EM INGLÊS.	93
FIGURA 34 –	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FC AOS 28 DIAS DE CURA, APRESENTANDO A PERDA DE MASSA EM 24, 48 E 72 H.....	93
FIGURA 35 –	ENSAIO DE ABRASÃO: IMAGENS DO CP DE CONCRETO COM 0,8% FC: (A) ANTES DO ENSAIO; (B) 24 H; (C) 48 H; (D) 72 H, APÓS ENSAIO	94
FIGURA 36 –	GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE ABRASÃO: (A) CP ANTES DO ENSAIO; (B) CP COM 0,8% FC APÓS 72 H; (C) CP REF APÓS 72 H.....	95
FIGURA 37 –	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FS (0,6; 0,8 e 1,0%)	97
FIGURA 38 –	CPs DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FS APÓS TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL: (A) ANÁLISE VISUAL INTERNA DA LIGAÇÃO FIBRA-CONCRETO; (B) IMAGEM OBTIDA POR MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO COM AUMENTO DE 20X	98
FIGURA 39 –	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FS (0,6; 0,8 e 1,0%) AOS 28 DIAS DE CURA.....	99
FIGURA 40 -	GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FS (0,6; 0,8 E 1,0%), COMPARATIVAMENTE AO CONCRETO REF.....	100
FIGURA 41 -	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FS AOS 28 DIAS DE CURA, QUANDO DO SURGIMENTO DA PRIMEIRA FISSURA E DA RUPTURA DO CP	101
FIGURA 42 –	IMAGEM DE FIBRAS DE COCO E SISAL OBTIDA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO COM AUMENTO DE 14X.....	102

FIGURA 43 –	IMAGEM DAS FIBRAS DE SISAL OBTIDAS EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO, COM AUMENTO DE 20X, APRESENTANDO ESPESSURA E COMPRIMENTO VARIADOS ENTRE 0,11 E 0,32 MM, E 3,04 E 5,03 MM, RESPECTIVAMENTE	102
FIGURA 44 –	IMAGENS DE CPS DE CONCRETO COM 0,8% FS APÓS ENSAIO DE IMPACTO: (A) RUPTURA TOTAL; (B) ALGUMAS FS MANTÊM O CP UNIDO.....	103
FIGURA 45 –	IMAGENS DE SUPERFÍCIE DE FRATURA DE CP DE CONCRETO COM 0,8% FS APÓS ENSAIO DE IMPACTO, MOSTRANDO AS FIBRAS DISTRIBUÍDAS: (A) OBTIDA EM CÂMERA FOTOGRÁFICA; (B) AMPLIAÇÃO DA IMAGEM (A) OBTIDA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO.	104
FIGURA 46 –	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FS AOS 28 DIAS DE CURA, APRESENTANDO A PERDA DE MASSA EM 24, 48 E 72 H.....	105
FIGURA 47 –	ENSAIO DE ABRASÃO: IMAGENS DO CP DE CONCRETO COM 0,8% FS: (A) 48 H DE ENSAIO; (B) 72 H, APÓS ENSAIO	105
FIGURA 48 –	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE CC (3, 5 e 8,5%).....	107
FIGURA 49 –	GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM PINTURA DE TiO_2	109
FIGURA 50 –	POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS COM 0% DE ADIÇÃO EM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR, CÂMARA DE SO_2 E CÂMARA DE NÉVOA SALINA.....	112
FIGURA 51 –	IMAGENS DAS BARRAS DE AÇO DOS CONCRETOS REF APÓS ENVELHECIMENTO DE 560 DIAS EM DESSECADOR (A) E NAS CÂMARAS DE SO_2 (B) E NÉVOA SALINA(C).....	113
FIGURA 52 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FC COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FC APÓS ENVELHECIMENTO DE 670 DIAS EM DESSECADOR	115
FIGURA 53 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FS COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FS APÓS ENVELHECIMENTO DE 720 DIAS EM DESSECADOR	115

FIGURA 54 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM CC COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 5% DE CC APÓS ENVELHECIMENTO DE 650 DIAS EM DESSECADOR	116
FIGURA 55 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM ARGAMASSA FOTOCATALÍTICA APÓS ENVELHECIMENTO DE 680 DIAS EM DESSECADOR.....	116
FIGURA 56 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2	117
FIGURA 57 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FS COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2 ; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FS APÓS ENVELHECIMENTO DE 720 DIAS EM CÂMARA DE SO_2	117
FIGURA 58 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM CC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2 ; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 5% DE CC APÓS ENVELHECIMENTO DE 650 DIAS EM CÂMARA DE SO_2	118
FIGURA 59 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2	118
FIGURA 60 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FC APÓS ENVELHECIMENTO DE 670 DIAS EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA .	119
FIGURA 61 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FS COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FS APÓS ENVELHECIMENTO DE 670 DIAS EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA..	119
FIGURA 62 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM CC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA	120
FIGURA 63 -	GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA	120

FIGURA 64 –	POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA CPS DE CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA À BASE DE TiO_2 , EM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR, CÂMARA DE SO_2 E CÂMARA DE NÉVOA SALINA.....	121
FIGURA 65 –	MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 560 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 40X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO: MAGNETITA, GOETITA E LEPIDOCROCITA; (D) DETALHE DA IMAGEM C.....	124
FIGURA 66 –	MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FC ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 40X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO: MAGNETITA, GOETITA E LEPIDOCROCITA; (D) DETALHE DA IMAGEM C; (E) FASE LEPIDOCROCITA EM FORMATO DE FLORES; (F) DETALHE DA LEPIDOCROCITA EM FORMA DE FLOR.....	125
FIGURA 67 –	MAPA OBTIDO POR EDS DOS PRODUTOS DE CORROSÃO DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FC ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) MULTI-ELEMENTOS; (B) DISTRIBUIÇÃO DO Cl; (C) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS OBTIDO POR ÁREA TOTAL	126
FIGURA 68 –	MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FS ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) E (B) COM AUMENTO DE 14X, EM DUAS REGIÕES DISTINTAS; (C) E (D) DETALHE DAS IMAGENS (A) E (B) COM 40X DE AMPLIAÇÃO	127
FIGURA 69 –	MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 0,8% DE FS ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS, MOSTRANDO A INTERFACE AÇO/CONCRETO: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 24X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (C) DETALHE DA INTERFACE COM AUMENTO DE 3000X	128
FIGURA 70 –	PERFIL DE ELEMENTOS QUÍMICOS (Fe, Ca E Cl) DE AÇO/CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FS, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS.....	129

- FIGURA 71 – MICROGRAFIAS DOS ÓXIDOS DE FERRO DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 0,8% DE FS ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 500X, MOSTRANDO AS DIVERSAS CAMADAS DE ÓXIDOS; (C) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AUMENTO DE 3000X; (D) DETALHE DA IMAGEM (C) COM AUMENTO DE 5000X; (E) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DOS CRISTAIS DA IMAGEM (D) OBTIDOS POR EDS 130
- FIGURA 72 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO PRODUZIDO COM CC E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 645 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) EM 40X; (C) ÓXIDOS DE FERRO COMO PRODUTOS DE CORROSÃO (MAGNETITA, GOETITA E LEPIDOCROCITA) 131
- FIGURA 73 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 680 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) EM 40X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO; (D) MAGNETITA E LEPIDOCROCITA EM FORMATO DE FLOR; (E) LEPIDOCROCITA EM CAMADAS 132
- FIGURA 74 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 560 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 14X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 90X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (D) COM AMPLIAÇÃO DE 3000X 133
- FIGURA 75 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REFORÇADO COM FC E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 670 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 14X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 90X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO COM AMPLIAÇÃO DE 250X; (D) COM AMPLIAÇÃO DE 3000X, DETALHE DA IMAGEM (C); (E) COM AMPLIAÇÃO DE 3000X, O ÓXIDO DE FERRO DENOMINADO LEPIDOCROCITA..... 134
- FIGURA 76 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REFORÇADO COM FS E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 720 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 14X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 90X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (D) DETALHE DOS PRODUTOS DE CORROSÃO, COM AMPLIAÇÃO DE 1000X 135
- FIGURA 77 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO PRODUZIDO COM 5% CC E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 650 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 90X; (C) ÓXIDOS DE FERRO COMO PRODUTOS DE CORROSÃO; (D) DETALHE DA IMAGEM C..... 136

FIGURA 78 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO ₂ DURANTE 680 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 90X; (C) ÓXIDOS DE FERRO (MAGNETITA) COMO PRODUTOS DE CORROSÃO; (D) PASTA CIMENTÍCIA ADERIDA À CAMADA DE ÓXIDOS DA BARRA METÁLICA	137
FIGURA 79 – MICROGRAFIAS DAS BARRAS METÁLICAS RETIRADAS DE CP DE CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR: (A) DO CONCRETO COM FC; (B) DO CONCRETO COM FS; (C) DO CONCRETO COM CC; (D) DO CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA	138
FIGURA 80 – MICROGRAFIA DA BARRAS METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR CONTENDO A FASE MAGNETITA E UMA CERTA PORÇÃO DE PASTA CIMENTÍCIA ADERIDA	138
FIGURA 81 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 560 DIAS; E ESPECTRO DE EDS DO ELEMENTO QUÍMICO CL OBTIDO AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO	139
FIGURA 82 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO ₂ POR 560 DIAS: (A) AMPLIAÇÃO DE 500X; (B) AMPLIAÇÃO DE 3000X, MOSTRANDO OS CRISTAIS A BASE DE S; (C) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS IDENTIFICADOS POR EDS DA IMAGEM (A); (D) ESPECTROS DE EDS DOS ELEMENTOS QUÍMICOS C, S E Fe OBTIDOS AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO.....	141
FIGURA 83 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FC, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS; E OS TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS OBTIDOS POR EDS CORRESPONDENTE À IMAGEM	142
FIGURA 84 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FC, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS; E ESPECTRO DE EDS DOS ELEMENTOS Cl E Fe, OBTIDOS AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO	143
FIGURA 85 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FS, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO ₂ POR 720 DIAS; E ESPECTROS DE EDS DO ELEMENTO Fe E S, OBTIDO AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO.....	144
FIGURA 86 – (A) MICROGRAFIA DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE CC ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO ₂ , APRESENTANDO MONOSSULFOALUMINATO DE CÁLCIO HIDRATADO; (B) DETALHE DA IMAGEM (A).....	145

FIGURA 87 – MICROGRAFIAS DOS CPS DE CONCRETO ENVELHECIDOS EM NÉVOA SALINA (A) COM FC, APRESENTANDO VAZIOS; (B) FS COM CRISTAIS DE CLORETO	146
FIGURA 88 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO REF COM ENVELHECIMENTO POR 560 DIAS: (A) EM DESSECADOR, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (C) EM CÂMARA DE SO ₂ , COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (D) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (E) DETALHE DA IMAGEM (B) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (F) DETALHE DA IMAGEM (C) COM AMPLIAÇÃO DE 200X	147
FIGURA 89 – (A) MICROGRAFIA, APÓS LIMPEZA, DA BARRA DE AÇO RETIRADA DO CONCRETO REF COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 560 DIAS; (B) MICROGRAFIA DO DETALHE DA IMAGEM (A); (C) OS TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DOS CRISTAIS DA IMAGEM (B) OBTIDOS POR EDS.....	148
FIGURA 90 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM 0,8% FC: (A) COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR POR 670 DIAS, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (C) COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (D) DETALHE DA IMAGEM (C) COM AMPLIAÇÃO DE 200X.....	149
FIGURA 91 – (A) MICROGRAFIA, APÓS LIMPEZA, DA BARRA DE AÇO RETIRADA DO CONCRETO COM 0,8% DE FC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS; (B) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS CORRESPONDENTE À IMAGEM: REGIÃO 1 (CRISTAIS) E REGIÃO 2 (METAL), OBTIDOS POR EDS	150
FIGURA 92 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM 0,8% FS: (A) COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X	151
FIGURA 93 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 680 DIAS: (A), COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (C) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (D) DETALHE DA IMAGEM (B) COM AMPLIAÇÃO DE 800X	152

FIGURA 94 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM CC, COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 650 DIAS: (A), COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 200X	153
FIGURA 95 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO ₂ : (A) POR 670 DIAS, CONCRETO COM FC, AMPLIAÇÃO DE 200X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 800X; (C) POR 650 DIAS, CONCRETO COM CC, AMPLIAÇÃO DE 200X.....	153
FIGURA 96 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO ₂ : (A) CONCRETO COM FS, AMPLIAÇÃO DE 200X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A); (C) CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA, AMPLIAÇÃO DE 200X.....	154
FIGURA 97 - TERMOGRAVIMETRIA DA FS: NATURAL, E DOSADAS EM CONCRETO ARMAZENADO EM DESSECADOR E CÂMARA DE NÉVOA SALINA, CARACTERIZADA EM ATMOSFERA OXIDANTE ATÉ 550 °C E INERTE DESTA ATÉ 850 °C	155
FIGURA 98 - TERMOGRAVIMETRIA DA FC: NATURAL, E DOSADAS EM CONCRETO ARMAZENADO EM DESSECADOR E CÂMARA DE NÉVOA SALINA, CARACTERIZADA EM ATMOSFERA OXIDANTE ATÉ 550 °C E INERTE DESTA ATÉ 850 °C	156
FIGURA 99 - MICROGRAFIAS DE FC: (A) NATURAL; RETIRADA DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (B) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X	156
FIGURA 100 - MICROGRAFIAS DE FC TRATADAS RETIRADAS DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X	157
FIGURA 101 - MICROGRAFIAS DE FS: (A) NATURAL; E RETIRADA DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (B) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X	158
FIGURA 102 - MICROGRAFIAS DE FS TRATADA RETIRADA DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 500X.....	158
FIGURA 103- TESTE DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE NO _x COM AÇÃO DA RADIAÇÃO UV-A AO LONGO TEMPO, EM ARGAMASSA PRODUZIDA COM 90% DE TiO ₂	159

FIGURA 104 - GRÁFICO RESULTANTE DO TESTE DE OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE NO _x , COM RADIAÇÃO UV-A, EM AMOSTRAS: (A) SEM TiO ₂ E (B) COM 5% TiO ₂ , AOS 28 DIAS DE CURA	160
FIGURA 105 - GRÁFICO RESUTANTE DOS VALORES MÉDIOS DOS TESTES DE OXIDAÇÃO DO POLUENTE NO _x , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSAS COM TIO ₂	161
FIGURA 106 - RESULTADOS DOS TESTES DE OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE NO _x , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSA COM 70% DE TiO ₂ , AOS 28 E 810 DIAS DE CURA	161
FIGURA 107 – MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DAS ARGAMASSAS FOTOCATALÍTICAS: ANTES DO TESTE FOTOCATALÍTICO (A) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 1000X; APÓS TESTE FOTOCATALÍTICO COM NO _x : (C) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (D) COM AMPLIAÇÃO DE 1000X	162
FIGURA 108 - GRÁFICO RESUMO DOS TESTES DE OXIDAÇÃO DO POLUENTE SO ₂ , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSAS COM TIO ₂	163
FIGURA 109 - RESULTADOS DOS TESTES DE OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE SO ₂ , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSA COM 50% DE TIO ₂ , AOS 28 E 425 DIAS DE CURA	164
FIGURA 110 –MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DAS ARGAMASSAS FOTOCATALÍTICAS APÓS TESTE FOTOCATALÍTICO COM SO ₂ : (A) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 1000X.....	165
FIGURA 111 - FOTO ILUSTRANDO ALGUMAS UNIDADES DE POSTES FABRICADAS COM AS DOSAGENS INDICADAS.....	166
FIGURA 112 – IMAGEM DO TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE POSTE PRODUZIDO COM ADIÇÃO DE FC NA FÁBRICA DE ARTEFATOS DE CONCRETO BARBOSA & BARBOSA, BAHIA.....	168

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DE MASSA ESPECÍFICA, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA DIVERSOS TIPOS DE FIBRAS E MATRIZ DE CIMENTO (BLEDZKI & GASSAN, 1999; RATNA PRASAD & MOHANA RAO, 2011; SILVA et. al., 2008)	39
TABELA 2 – DOSAGENS DA ARGAMASSA FOTOCATALÍTICA, CONTENDO O TEOR DE TiO_2 (EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO) E O RESPECTIVO A/C	70
TABELA 3 – ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICOS E MECÂNICOS DO CIMENTO CP II – Z 32.....	72
TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP II – Z 32 POR XRF.....	72
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO	73
TABELA 6 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AGREGADO MIÚDO POR XRF	74
TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO PASSANTE NA PENEIRA DE 2,4 MM (UTILIZADO NOS CPS FOTOCATALÍTICOS)	75
TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO	76
TABELA 9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CC POR XRF	79
TABELA 10 – DADOS RELATIVOS À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA OS CONCRETOS REF E COM 0,8% DE FC TRATADA E SEM TRATAMENTO	96
TABELA 11 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA AS COMPOSIÇÕES REF E 0,8% FS COM E SEM TRATAMENTO	106
TABELA 12 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE CC (3 e 5%) AOS 28 DIAS DE CURA	107
TABELA 13 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DAS DOSAGENS DE CONCRETO REF E COM PINTURA DE TiO_2	108
TABELA 14 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS REF, FC, FS, CC E TiO_2 : ABSORÇÃO, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS	110
TABELA 15 – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (k) DOS CONCRETOS REF, FC, FS, CC E COM PINTURA DE TiO_2	111
TABELA 16 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DOS CPS DE CONCRETO PRODUZIDOS A PARTIR DAS DOSAGENS DOS POSTES FABRICADOS NA BARBOSA & BARBOSA	166

TABELA 17 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS CRUZETAS FABRICADAS COM CC, FC, FS E REF NA BARBOSA & BARBOSA, BAHIA.....	167
TABELA 18 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E ABSORÇÃO DOS POSTES FABRICADOS	168

LISTA DE DE SIGLAS, SÍMBOLOS, UNIDADES E ABREVIATURAS

#	Peneira
a/c	Fator água/aglomerante
ANOVA	Análise de variância
C	Elemento químico Carbono
CC	Cinza da casca de coco verde
CH ₄	Metano
Cl	Elemento químico Cloro
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Corpo de prova
cps	Contagem de fóton por segundo
CSE	Eletrodo de cobre-sulfato de cobre
CSH	Silicato de cálcio hidratado em forma de gel
EDS	Sonda de raios X
EIS	Espectroscopia de impedância eletroquímica
FC	Fibra de coco
Fe	Ferro
FS	Fibra de sisal
h ⁺	Lacuna de energia
H ₂ O	Água
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
NH ₃	Amônia
NO	Monóxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO ₃	Nitrato
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
OCP	Potencial de circuito aberto
•OH	Radical hidroxila
POA	Processo oxidativo avançado
REF	Concreto referência (sem adições ou substituições)

S	Elemento químico Enxofre
S _d	Desvio padrão
SEM	Microscopia eletrônica de varredura
SO ₂	Dióxido de enxofre
TGA	Análise termogravimétrica
TiO ₂	Dióxido de Titânio
UV	Radiação ultravioleta
XRD	Difratometria de raios X
XRF	Espectrometria de fluorescência de raios X

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 ESTRUTURA DA TESE	29
1.2 OBJETIVOS	30
1.2.1 Objetivo Geral	30
1.2.2 Objetivos Específicos	30
1.3 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	31
1.4 PUBLICAÇÕES RESULTANTES.....	32
2. REVISÃO DA LITERATURA	35
2.1 CONCRETO.....	35
2.2 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA ADIÇÃO AO CONCRETO.....	35
2.2.1 Fibras orgânicas.....	36
2.2.2 Cinzas de casca de coco verde	43
2.3 FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA	46
2.4 DURABILIDADE.....	53
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
3.1 MATERIAIS	56
3.1.1 Preparação dos insumos	57
3.1.2 Caracterização dos insumos.....	58
3.2 MÉTODOS	61
3.2.1 Dosagens de Concreto	61
3.2.2 Caracterização do Concreto	62
3.2.3 Teste fotocatalítico	68
3.2.4 Fabricação de protótipos de artefatos	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1 MATÉRIAS PRIMAS	72
4.1.1 Caracterização dos Insumos.....	72
4.2 DOSAGENS DE CONCRETO E ARGAMASSA.....	84

4.2.1	Caracterização do Concreto	84
4.2.2	Estudo de Durabilidade	112
4.2.3	Estudo Fotocatalítico	158
4.3	ARTEFATOS DE CONCRETO	165
4.4	ANÁLISE AMBIENTAL	169
5.	CONCLUSÕES	174
6.	TRABALHOS FUTUROS	176
7.	REFERÊNCIAS	177

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento urbano, caracterizado pelas atividades industriais e o tráfego motorizado, tem causado crescente poluição do ar. Exemplos notáveis são os óxidos de nitrogênio (NO_x) resultantes da queima de combustível em usinas e veículos, assim como o monóxido de carbono, hidrocarbonetos, dióxido e trióxido de enxofre resultantes da combustão em processos industriais. Durante o processo, as altas temperaturas ativam a reação entre o nitrogênio e o oxigênio, formando o monóxido e o dióxido de nitrogênio (NO e NO_2). Estes gases são prejudiciais por serem responsáveis pela ocorrência de chuva ácida, presença de ozônio no nível do solo, aquecimento global, doenças respiratórias e cardiovasculares.

Segundo o Relatório da Qualidade do Ar da região metropolitana de Curitiba (IAP, 2013), os veículos automotores, considerados fontes móveis de poluição, são predominantes nos grandes centros urbanos. Comparando as emissões industriais com as de tráfego, o número de veículos é muito maior que o número de indústrias, sendo mais fácil controlar alguns grandes poluidores do que muitos pequenos e, além disso, a grande maioria das indústrias está situada fora dos perímetros urbanos e lançam seus efluentes gasosos através de chaminés a elevadas alturas, enquanto os veículos liberam os poluentes nos centros urbanos e em teores que possibilitam a inalação direta pelos seres humanos. Segundo o DETRAN-PR (Departamento de Trânsito do Paraná), a frota paranaense de veículos motorizados em 2012 foi de quase 6 milhões, crescente em 6,4% em relação a 2011. Isto representou uma elevada emissão de gases NO_x na atmosfera.

A redução da poluição ambiental é motivo de longos debates e estudos em âmbito mundial pela necessidade de extensão da qualidade de vida no planeta. Há ações governamentais e não governamentais diretas, tanto na diminuição de sua emissão pelo setor industrial quanto no sentido de sua eliminação na atmosfera. Este último caso pode ocorrer pela aplicação de produtos fotocatalíticos, ou seja, aqueles que são produzidos com semicondutores e utilizam a luz solar como fonte de energia para alterar as taxas de reações químicas, e assim, decompor alguns poluentes orgânicos e inorgânicos (como por exemplo, as substâncias orgânicas

voláteis e os óxidos de nitrogênio) na atmosfera. Dados da literatura do Group Italcementi Spa, dotada de patente segurada na área de pavimentação, indicam que o emprego de tais substâncias, especialmente dióxido de titânio (TiO_2) nanométrico, em argamassas e concretos têm grande desempenho na conversão fotoquímica do NO_x em íons de nitrato (NO_3) e, portanto, na redução da concentração do gás poluente.

Na produção industrial, as indústrias que mais contribuem para a geração de poluentes na atmosfera é a do cimento. Esta é responsável pela produção de 5% de toda a emissão de dióxido de carbono (CO_2) do planeta gerado pelo homem. É a principal matéria-prima do produto mais consumido no planeta (em termos de volume), o concreto, ficando atrás, apenas, da água (METHA & MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 1997; IEA, 2009).

A demanda estimada de concreto está crescendo ao longo dos anos. Em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, a produção de cimento aumenta conforme o aumento da modernização e, este crescimento, é contínuo. A produção global de cimento no Brasil em 2012, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento foi de 69,3 milhões de toneladas. Cenários de menor e de maior crescimento mundial foram criados para uma prospecção de demanda de cimento para 2050, entre 3,69 e 4,40 bilhões de toneladas, respectivamente. Além disso, as obras em concreto consomem entre 15% e 50% de todos os recursos naturais extraídos do planeta e, só no Brasil, em 2008, houve um consumo anual de mais de 400 milhões de toneladas de agregados (britas e areia natural). Assim, qualquer substituição ou modificação do produto em escala suficiente para reduzir as emissões de poluentes é de interesse ecológico, e propicia uma significativa melhoria na qualidade de vida da população.

Outro efeito agravante da poluição ambiental está centrado na quantidade de materiais ou resíduos depositados ou lançados de forma desordenada e a céu aberto por falta de reuso, propiciando a proliferação de insetos, contaminação do solo, ar, águas superficiais e subterrâneas. Exemplos são as cascas de coco verde, que são geradas após o consumo de sua água, que têm como destino final os rios, os terrenos baldios e o aterro sanitário. Estudos já comprovaram que as cascas de

coco, que representam em torno de 80% do peso do fruto, podem ser aproveitadas para diferentes fins (ROSA *et al.*, 2001).

Outra possibilidade, pela abundância de plantio no estado da Bahia, é a adição de fibras naturais processadas de sisal e de coco em misturas cimentícias. O uso de tais materiais pode incutir uma maior resistência mecânica ao concreto armado, considerando-se o mesmo consumo de cimento por metro cúbico. Além disso, mesmo sendo o concreto o material estrutural mais utilizado no mundo pelas suas características de resistência à compressão, resistência à ação da água, baixo custo, alta disponibilidade, facilidade de moldagem e obtenção de diferentes formas e tamanhos, este apresenta limitações, entre elas a sua baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando o material é tracionado. Isto o torna susceptível às fissuras e microfissuras em seu interior, contribuindo também para o ingresso de agentes agressivos. Algumas pesquisas estão sendo desenvolvidas com concreto à base de fibras de coco e sisal no sentido de melhorar esta propriedade, entre elas a de Ramli, Kwan & Abas (2013) que, concluíram que a permeabilidade das amostras com adição de fibras de coco aumenta em ambiente marinho tanto quanto em atmosférico; mas as fibras restringem o desenvolvimento de fissuras.

Neste foco, a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida, segundo o ACI (American Concrete Institute) Committee 201 (2008), como a capacidade de resistir à ação de intempéries, ataques químicos com agentes agressivos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, sem perder sua funcionalidade e formato originais. Esta durabilidade é fortemente afetada pelo ambiente em que as estruturas em concreto armado estão inseridas, ocasionando uma maior deterioração quando em ambiente agressivo, como regiões litorâneas e industriais. Neste sentido, os íons cloreto podem causar despassivação da armadura e desagregação do concreto, enquanto os íons sulfato expansão, fissuração e lascamento; ambos provocam a degradação da estrutura e, portanto, a redução do tempo de vida útil.

Vários são os métodos utilizados para a constatação e a avaliação da corrosão em estruturas de concreto armado, porém os mais utilizados são os eletroquímicos. Dentre eles, o potencial de corrosão é uma das técnicas qualitativas largamente utilizadas para o monitoramento da corrosão das armaduras, que

consiste na medição da diferença de potencial elétrico entre o aço da armadura e um eletrodo de referência, indicando a probabilidade do surgimento de corrosão das barras de aço quando o concreto está submetido a ciclos de penetração acelerados de íons agressivos. Outra técnica é a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), que permite a análise eletroquímica e dielétrica de materiais quando submetidos a um sinal de corrente alternada em uma varredura de frequências (MACDONALD, 1992). Para o concreto armado, por esta técnica é possibilitada a medição da resistência de polarização, assim como o acompanhamento dos processos físicos e a avaliação da interface aço/concreto (MARTINEZ & ANDRADE, 2008).

Assim, a fim de reduzir o impacto ambiental e, também, buscando novos métodos sustentáveis, a pesquisa foi direcionada em três temas: a adição de fibras de coco e de sisal no concreto, com a intenção de utilizar dois componentes naturais e renováveis amplamente produzidos no país; o desenvolvimento de um novo insumo a partir da queima de cascas de coco verde, proporcionando um implemento da durabilidade do material além de promover maior economia de aglomerante; e, por fim, o desenvolvimento de equipamento para a investigação da fotocatalise com os gases poluentes NO_x e SO_2 (dióxido de enxofre) em amostras de argamassa com pintura à base de nano- TiO_2 , propiciando melhoria da qualidade do ar. Com a preocupação em termos de durabilidade e atendendo o requisito de vida útil das estruturas, o desempenho destes materiais foi acompanhado pelas técnicas eletroquímicas quando envelhecidos em meios artificiais marinho e industrial.

A partir desta pesquisa pode-se inferir uma ampla extensão da aplicação a concretos de forma geral, porém o estudo de caso foi focado em estruturas de rede de distribuição de energia elétrica, uma vez que o mesmo foi subsidiado por uma concessionária do setor. Além disso, as áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica são grandes consumidores de concreto em suas obras de engenharia, tais como: postes, blocos estruturais e cruzetas (consumo de concreto entre 50 e 100 m^3/km de linha de distribuição e transmissão); bem como em barragens das usinas hidroelétricas (cerca de 1 milhão de m^3 de concreto para cada MW instalado), dentre outras estruturas (JOUKOSKI *et al.*, 2002).

1.1 ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução contendo sucintamente os principais temas da pesquisa e as características do trabalho.

No segundo capítulo, está apresentada uma revisão bibliográfica sobre a temática da pesquisa, fundamentada em publicações científicas internacionais. Os temas abordados foram: fotocatalise heterogênea, materiais alternativos para adição ao concreto, especificamente a cinza de casca de coco verde, as fibras orgânicas de coco e sisal e, também, a questão da durabilidade em estruturas de concreto quanto ao ingresso de íons cloreto e sulfato.

No terceiro capítulo consta o programa experimental, sendo apresentadas apenas as metodologias desenvolvidas para este trabalho, não normativas. As metodologias com normas próprias de execução estão citadas e referenciadas.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados obtidos e a análise dos dados, referenciando-se aos encontrados na literatura.

Por fim, no quinto e último capítulo estão as conclusões obtidas a partir dos resultados alcançados ao longo trabalho, e também, as sugestões para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver, avaliar e comparar dosagens de concreto e argamassas de cimento Portland com substâncias minerais, orgânicas e fotocatalíticas que contribuam para a redução do impacto ambiental.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver dosagens de argamassa com substância fotocatalítica e de concreto com substâncias minerais e orgânicas do tipo: cinzas da casca de coco verde (CC) e fibras de coco (FC) e de sisal (FS);
- Determinar a eficiência fotocatalítica das dosagens de argamassa com substância fotocatalítica TiO_2 , pelas alterações de volume e concentração dos poluentes gasosos NO_x e SO_x , dois dos principais gases de origem industrial e urbana;
- Investigar o mecanismo de degradação da estrutura de concreto em ambiente marinho e industrial, por intermédio de método eletroquímico e pela análise visual e microestrutural;
- Investigar as propriedades físicas, mecânicas e as características pós-ruptura dos produtos desenvolvidos segundo critérios normalizados (planicidade, defeitos superficiais como trincas, poros, vazios, segregação da argamassa, etc.) e avaliação da possibilidade de instalação dos elementos estruturais em redes de energia elétrica.

1.3 MOTIVAÇÃO E CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

A poluição ambiental oriunda de diferentes fontes, móveis ou estáticas, é a grande preocupação da sociedade moderna. Entre os grandes representantes inseridos na geração deste problema está a indústria cimentícia, os veículos automotores e os materiais e os resíduos sólidos produzidos e depositados sem critérios ambiental e de utilização.

No Brasil, a atividade da construção civil mantém-se aquecida com a expansão imobiliária de programas de moradia para baixa e média renda e as grandes obras de infraestrutura em concreto armado. Várias pesquisas estão sendo executadas em misturas cimentícias com o objetivo de minimizar a emissão de gases poluentes na atmosfera, seja pela adição de materiais alternativos na elaboração de argamassas e concretos, como no desenvolvimento de novos cimentos.

A utilização de adições minerais e orgânicas na produção de concreto, em substituição ao cimento, ou mesmo, somente como adição ao volume do material, propicia, primeiramente, uma redução no impacto ambiental no que tange a fabricação de cimento, reduzindo a emissão de CO₂ e o consumo de energia. Além disso, busca-se um melhor desempenho mecânico e de durabilidade do concreto, assim como economia na fabricação de artefatos em concreto.

Outra vantagem no desenvolvimento de concretos com resíduos, caso da cinza da casca de coco verde, é a redução da poluição visual oriunda do descarte desordenado, que ultrapassa o ganho econômico pelo valor não mensurável dos benefícios ao meio ambiente.

Em relação ao desenvolvimento de argamassas e concretos com substâncias fotocatalíticas, neste caso nano-TiO₂, o grande diferencial é a elevada redução de gases poluentes. Foi constatada na cidade de Bergamo (Itália), em uma rua de 500 m pavimentada com blocos de concreto fotocatalíticos, uma redução da poluição de 30 a 40%. Considerando um tráfego de 400 automóveis, isto implica em uma redução de gases poluentes, comparável à redução de tráfego de 120 a 150 automóveis (MELO, 2011).

Nesta pesquisa foram considerados os artefatos de concreto do setor elétrico como tema, devido, especialmente, ao elevado consumo de concreto pelo setor. No entanto, não está apresentada nenhuma particularidade, possibilitando a aplicação dos resultados nas diferentes obras de engenharia. Assim, isto contribuirá para redução do aquecimento global e para uma melhor qualidade de vida.

Com a aplicação prática desta pesquisa, poderá haver diminuição nos custos do quilômetro de rede de distribuição, com benefício aos clientes e à concessionária, além da redução dos impactos ambientais pelo uso sensato de resíduos e a aplicação de novas tecnologias.

1.4 PUBLICAÇÕES RESULTANTES

- Artigos completos publicados em periódicos

BONATO, M. M.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; VIEIRA, M. E.; ESMANHOTO, E.; CERQUEIRA, D. P.; SANTOS, J. C. M. Method for determining the photocatalytic potential of Portland cement mortar containing TiO_2 for decomposing the pollutant nitrogen monoxide. *Química Nova*, v. 37, p. 1063-1066, 2014.

BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; PORTELLA, K. F.; BRONHOLO, J. L.; VIEIRA, M. E.; SANTOS, J. C. M. Desempenho de postes de concreto com adições orgânicas e fotocatalíticas. *Espaço Energia*, v. 20, p. 18-24, 2014.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; SANTOS, J. C. M. DOS. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. *Construction and Building Materials*, v. 54, p. 460-465, 2014.

BONATO, M. M.; PORTELLA, M. O. G.; PORTELLA, K. F.; BRONHOLO, J. L.; ESCOBEDO, M. L.; PEREIRA, P. A. M.; BRAMBILLA, K. J. C.; ZALPA, J. C.; VIEIRA, M. E.; SANTOS, J. C. M.; CERQUEIRA, D. P. Resistência mecânica e corrosão de concreto com adição de fibras de coco em ambiente salino. *Espaço Energia*, v. 17, p. 27-33, 2012.

- Artigos completos aceitos para publicação em periódicos

BONATO, M. M.; BRAGANÇA, M. D'Ó. G. P.; PORTELLA, K. F.; VIEIRA, M. E.; BRONHOLO, J. L.; SANTOS, J. C. M.; CERQUEIRA, D. P. Argamassas fotocatalíticas e concretos com adições de fibras de coco e sisal para a redução de impactos ambientais de gases poluentes. *Cerâmica*, aceite em 28/06/2014.

- Trabalhos completos publicados em anais de congressos

BONATO, M. M. B., PORTELLA, K. F., BRAGANÇA, M. O. G. P., BRONHOLO, J. L., SANTOS, J. C. M. Influência da composição química de escória de alto forno nas propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto. In: 1º Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. Foz do Iguaçu – PR, maio de 2014.

BONATO, M. M.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; SANTOS, J. C. M. DOS; CERQUEIRA, D. P.; VIEIRA, M. E. Avaliação do potencial de corrosão de concretos com adições alternativas em meio marinho e industrial. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON 2013. Gramado – RS, outubro de 2013.

BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; BONATO, M. M.; ESCOBEDO, M. L.; GOBI, R. M.; MARINO, C. E. B. Estudo de Manifestação Patológica por Sulfato em Argamassa Preparada com Agregado Artificial Reativo. In: 55º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON 2013. Gramado – RS, outubro de 2013.

PORTELLA, M. O. G.; PEREIRA, P. A. M.; MEDEIROS, B. L.; DA SILVA, J. M.; BRAMBILLA, K. C.; BONATO, M. M.; PORTELLA, K. F.; BRONHOLO, J. L.; CERQUEIRA, D. P.; SALLES, R.; CABUSSÚ, M. S. Physicochemical Performance of Concrete with Added Natural Fiber of Coconut and Sisal. In: 20th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2012 – Procedia Engeneering. Praga – República Checa, agosto de 2012.

PORTELLA, M. O. G.; PEREIRA, P. A. M.; MEDEIROS, B. L.; DA SILVA, J. M.; BRAMBILLA, K. C.; BONATO, M. M.; PORTELLA, K. F.; ESMANHOTO, E.; CERQUEIRA, D. P.; SALLES, R.; CABUSSÚ, M. S. Photocatalytic potential of concrete with TiO_2 to reduce the greenhouse gas. In: 20th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2012. Praga – República Checa, agosto de 2012.

BONATO, M. M.; PORTELLA, K. F.; BRONHOLO, J. L.; DOS SANTOS, J. C. M.; RODRIGUES, L. E.; CABUSSÚ, M. S. Desempenho mecânico à compressão de concreto com adição de fibras de coco. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON 2011. Florianópolis – SC, outubro de 2011.

- Patentes depositadas

PORTELLA, K. F.; BONATO, M. M.; PORTELLA, M. O. G.; PEREIRA, P. A. M.; SILVA, J. M.; CERQUEIRA, D. P.; SANTOS, J. C. M.; RODRIGUES, L. E.; MENDES, J. C.; ESMANHOTO, E.; BRAMBILLA, K. J. C. Argamassa fotocatalítica para estruturas de concreto em geral. Patente de produto. INPI BR 10 2012 0315378. Dez/2012.

KANNING, R.; PUPPI, R. F. K.; PORTELLA, M. O. G.; PEREIRA, P. A. M.; MEDEIROS, B. L.; DA SILVA, J. M.; BONATO, M. M.; PORTELLA, K. F.; CERQUEIRA, D. P.; CABUSSÚ, M. S.; DOS SANTOS, J. C. M.; RODRIGUES, L. E. Cinza de Folhas de Bananeira como Material Pozolânico. Patente de produto. INPI BR 10 2012 016921 5. Julho de 2012.

- Transferência de tecnologia

Aline Contin Carvalho; Aline Pescarolo e Ana Carolina Simioni no desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná em 2012, intitulado “Uso de argamassa cimentícia com adição de dióxido de titânio por remoção de SO_2 do ar”.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CONCRETO

O cimento ou o aglomerante hidráulico, como é chamado o cimento Portland, é o elemento essencial do concreto, um material de construção fundamental e responsável pela infraestrutura da sociedade mundial.

O concreto pode ser considerado um material compósito, segundo Mehta & Monteiro (2008), composto de um meio aglomerante contínuo (pasta de cimento) onde certa quantidade de partículas ou fragmentos de agregados está dispersa, e contém também vazios de várias formas e tamanhos, os quais são inerentes ao processo de produção e cura do material. Desta forma, apresenta uma microestrutura altamente complexa, que possibilita aumento de sua resistência mecânica ao longo do tempo (inclusive anos), pelas reações de hidratação do cimento. No entanto, a exposição do concreto a ambientes mais agressivos pode propiciar um aumento da porosidade do material pela entrada de agentes agressivos, os quais dissolvem os produtos de hidratação do cimento, possibilitando a ocorrência de uma redução na sua resistência mecânica e na durabilidade. Às vezes, os produtos da interação entre o agente agressivo e a pasta de cimento podem recristalizar nos vazios e microfissuras, aumentando a resistência e a durabilidade do produto.

2.2 MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA ADIÇÃO AO CONCRETO

A substituição do cimento Portland por adições minerais é possível devido a sua composição similar. O primeiro é constituído de silicatos, aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio, enquanto estas apresentam compostos sílico-cálcico-aluminosos. As adições mais empregadas no cimento e/ou concreto tanto em função da disponibilidade, desempenho final e do custo são as pozolanas, que reagem com a cal proveniente das reações de hidratação; e a escória granulada de alto forno, que possui propriedades pozolânicas e cimentícias devido ao alto teor de cálcio (SONG & SARASWATHY, 2006).

Vários pesquisadores já expuseram as vantagens técnicas e econômicas da utilização de adições minerais em estruturas de concreto. As principais características são sua maior durabilidade e resistência a ataques químicos, ambas evidenciadas pela presença de uma microestrutura mais fina e homogênea devido ao refinamento dos poros e grãos, obstruindo assim, a percolação de fluidos pelos poros (METHA & MONTEIRO, 2008).

Uma outra alternativa é o concreto reforçado com fibras naturais, que exhibe quase o mesmo desempenho de compósitos de concreto convencional reforçado com fibras metálicas, sintéticas ou orgânicas. Na grande maioria dos casos, as fibras servem para retardar o início e a propagação de trincas na matriz de concreto sob tensão e deformação última. Enquanto as resistências à compressão e à tração axiais dos compósitos cimentícios reforçados com fibras não são afetados positivamente nem negativamente por estas, segundo Wei & Meyer (2014), as suas tenacidades na fratura têm um ganho substancial em cargas cíclicas.

2.2.1 Fibras orgânicas

As fibras vegetais são temas de diversas pesquisas nos últimos anos, principalmente em relação à sua constituição, às suas propriedades mecânicas e às possíveis utilizações (REDDY & YANG, 2005; BLEDZKI & GASSAN, 1999; KHEDARI *et al.*, 2005). Estas, foram muito utilizadas durante um grande período, porém o surgimento de novas tecnologias fez o seu uso decrescer. Recentemente, por questões ambientais e econômicas, retomou-se o desenvolvimento de novos produtos com fibras naturais e o estudo do comportamento mecânico e de durabilidade dos compósitos (TOLEDO FILHO *et al.*, 2003; MULINARI *et al.*, 2011; WANG & HUANG, 2009; MANNAN & GANAPATHY, 2004). Aliado a isto, a comunidade de pesquisa em área estrutural já considera os compósitos reforçados com fibras naturais como materiais estruturais, sustentáveis e promissores devido às interessantes propriedades mecânicas, reciclabilidade/produção e uso sustentável ao meio ambiente (BELAADI *et al.*, 2013).

As fibras vegetais são compósitos naturais com estruturas celulares constituídos, basicamente, de celulose, hemicelulose e lignina, em diferentes camadas, além de pectina e minerais. A celulose é o principal constituinte

estruturante das fibras, sendo responsável pela sua resistência mecânica, é um polímero linear constituído por um único tipo de unidade de açúcar. A hemicelulose normalmente atua como um elemento de ligação entre a celulose e a lignina, não estando diretamente correlacionada à resistência e dureza, é um polímero feito de vários polissacarídeos. A lignina fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, influenciando a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise. Esta, é uma mistura amorfa e heterogênea de polímeros aromáticos e monômeros de fenilpropano. A pectina tem a função aglutinante e os minerais são os responsáveis pela formação das cinzas após a incineração das fibras (JOHN *et al.*, 2005).

Segundo Rowell *et al.* (1997), as propriedades mecânicas e a estrutura física das fibras lignocelulósicas são influenciadas pela composição química das mesmas. No entanto, não só os teores de celulose, de hemicelulose e lignina podem indicar a melhor utilização das fibras. É necessário fazer uma análise mais detalhada e obter dados como: tipo e qualidade de celulose, já que cada qual tem uma estrutura diferente que influencia as suas propriedades mecânicas; idade, que determina uma maior ou menor quantidade dos constituintes; a relação entre os teores de celulose, hemicelulose e lignina; e o grau de cristalização das fibrilas que formam as fibras, além de se verificar as suas propriedades mecânicas (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

Como já mencionado, o concreto armado apresenta baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando este é tracionado, tornando-o susceptível às fissuras e microfissuras em seu interior (METHA & MONTEIRO, 2008). A adição de fibras ao concreto funciona como uma ponte de transferência de tensões pelas fissuras, proporcionando um aumento da energia associada à ruptura do material e à restrição à propagação de fissuras, propiciando um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil para o concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Na FIGURA 1, está ilustrado este comportamento das fibras, apresentando no item (A), as curvas típicas de carga-deflexão para o concreto convencional e o reforçado com fibras. Enquanto o concreto convencional se rompe repentinamente, assim que a deflexão na resistência à flexão máxima é atingida, o concreto reforçado com fibras continua a suportar cargas, até mesmo superiores à deflexão na fratura do concreto convencional. Desta forma, o concreto reforçado com fibras não se

rompe imediatamente no surgimento da primeira fissura, como é o caso do concreto convencional, representado na FIGURA 1(B). Figueiredo (2011) afirma que a falha ocorre no concreto reforçado com fibras, principalmente, pelo arrancamento ou escorregamento da mesma.

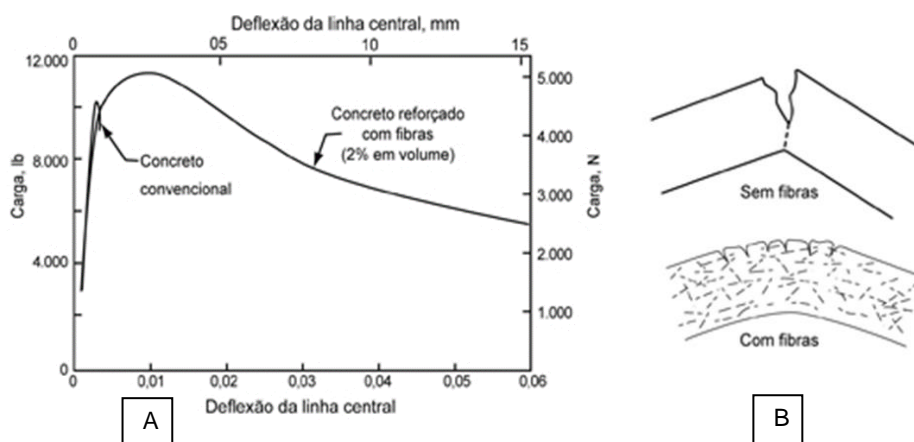


FIGURA 1 – A) CURVAS CARGA-DEFLEXÃO TÍPICAS DO CONCRETO CONVENCIONAL E DO CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS, B) DESENHO ESQUEMÁTICO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO APÓS FRATURA

FONTE: METHA & MONTEIRO, 2008 APUD (A) HANNA, 1977 E (B) JOHNSON, 1980

As fibras naturais apresentam elevada resistência à tração e baixo módulo de elasticidade quando comparadas às fibras sintéticas, conforme mostrado na TABELA 1, o que pode propiciar um desempenho mais favorável no compósito concreto. Nesta tabela, constam dados obtidos na literatura de massa específica, da resistência à tração e do módulo de elasticidade de algumas fibras naturais e artificiais, além da matriz de cimento para comparação.

Uma das desvantagens da utilização de fibras naturais é a elevada variação nas características das mesmas, o que pode direcionar a imprevisíveis propriedades do concreto (LI *et al.*, 2006). Segundo Silva (2008b), os valores de resistência à tração das fibras naturais são difíceis de estabelecer devido à larga dispersão na caracterização mecânica, tanto pelas condições de teste como pelas características da planta (fonte da planta, idade, mecanismo de extração da fibra e a presença de defeitos) e a área de medição.

TABELA 1 – VALORES DE MASSA ESPECÍFICA, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA DIVERSOS TIPOS DE FIBRAS E MATRIZ DE CIMENTO (BLEDZKI & GASSAN, 1999; RATNA PRASAD & MOHANA RAO, 2011; SILVA *et. al.*, 2008)

Propriedades	Massa específica (kg/m ³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Sisal	1370-1450	227-800	8,4-20
Coco	1177	95-118	2,8
Bambu	1158	73-505	10-40
Banana	1031	384	20-51
Canhamo	1500	900	34
Nylon	1100	900	4
Tâmara	1375	70-170	2,5-4
Polietileno	913	0,7	0,3
Polipropileno	913	250-750	1-7,7
Matriz de cimento	2500	3,7	10-45

Além disso, Savastano & Warden & Coutts (2000) citaram que os componentes ácidos liberados pelas fibras naturais podem reduzir o tempo de solidificação da matriz de cimento. Para Sedan *et al.* (2008), a adição da fibra pode aumentar em 45 min o tempo para solidificação da pasta de cimento pela presença de pectina, que pode fixar o cálcio e impedir a formação de estruturas de CSH, ou seja, silicato de cálcio hidratado em forma de gel. Segundo Stancato & Burke & Beraldo (2005), os componentes hemicelulose e celulose das fibras, àqueles que contêm açúcar, podem contribuir para impedir a hidratação do cimento.

Uma das grandes preocupações em compósitos com fibras naturais é a adesão destas com o material da matriz, já que é na região da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço. Diversos métodos podem ser utilizados com o objetivo de modificar a estrutura e a superfície da fibra, visando melhorar a aderência e/ou interação com a matriz, e assim, resultando em melhor desempenho das propriedades mecânicas. Entre eles, existem os métodos físicos

como o alongamento, calandragem e tratamentos térmicos, e os métodos químicos, com o uso de bases e ácidos fortes e fracos, isotiocianatos, ácido acético, silanos, hidróxido de sódio, entre outros (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

A alcalinização é um dos métodos mais antigos de modificação das fibras vegetais, e consiste em um tratamento alcalino, ou seja, a aplicação de uma substância com pH alcalino (superior a 7) a fim de limpar a superfície e retirar as graxas e as cêras intrínsecas ao material, removendo parcialmente a lignina e a hemicelulose. Este processo promove o aumento da rugosidade da superfície da fibra, propiciando melhor adesão com outros materiais (LI & MAI & YE, 2000; VALADEZ-GONZALEZ *et al.*, 1999).

Entre as características da alcalinização nas fibras naturais tem-se: redução da densidade e da rigidez na região interfibrilar, o que facilita o reagrupamento entre as cadeias; e o inchaço das fibras pela absorção da solução aquosa, o que propicia um distanciamento entre as cadeias celulósicas, e assim, a quebra das ligações de hidrogênio. Desta forma, este processo disponibiliza grupos para efetuarem ligações de hidrogênio intramoleculares e intermoleculares, àqueles que antes eram inacessíveis a agentes químicos (BLEDZKI & GASSAN, 1999).

2.2.1.1 Fibras orgânicas de coco

As cascas do coco verde, o qual é muito consumido em cidades litorâneas e turísticas, são resíduos sólidos gerados em larga escala, que têm como destino final os rios, os terrenos baldios e os aterros sanitários. O uso da fibra do coco verde (FC) já é comprovado em briquetes, substrato agrícola, mantas e retentores de sedimentos, matrizes poliméricas, isolante térmico e acústico associado ao aglomerado de cortiça, chapa de partículas e telhas. Isto ocorre principalmente pela preocupação em relação ao grande volume ocupado pelas cascas de coco e por apresentar uma degradação lenta, em torno de 8 anos (ROSA, 2010).

As FCs são materiais lignocelulósicos obtidos do mesocarpo de cocos e caracterizam-se pela sua dureza e durabilidade, atribuídas ao alto teor de lignina (cerca de duas a quatro vezes os valores existentes para as fibras de juta e sisal), conferindo-lhe, um comportamento singular frente às outras fibras naturais (SILVA *et*

al., 2006; VAN DAM *et al.*, 2004; HÜTTERMANN *et al.*, 2001). Nas fibras de coco, o teor de lignina, que é um dos principais constituintes, varia em função da idade do fruto, sendo o percentual em torno de 20% para as fibras oriundas de coco jovem, colhido com 6 meses, e de, aproximadamente, 35% no fruto maduro, com 11 meses (VAN DAM *et al.*, 2004).

A FC apresenta percentual de celulose mediano (entre 31 e 37%), baixa densidade ($1,2 \text{ g/cm}^3$) e elevado percentual de alongamento (em geral, 8 a 20 vezes superior às outras fibras), segundo Bledzki & Gassan (1999) e Pacheco-Torgal & Jalali (2011). De acordo com a TABELA 1, os valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade são baixos quando comparados às demais fibras naturais. Assim, a utilização da FC em um compósito tende a diminuir a densidade do material com bom potencial de alongamento e capacidade de reforço mediana, porém com possibilidades de aumento de desempenho pela interação fibra-matriz devido à ação aglutinante da lignina.

Bento *et al.* (2008) elaboraram uma análise comparativa entre o concreto convencional e o concreto com FC e o indicaram para a sua utilização em fins não estruturais, como vedação, pois apresentou características térmicas e acústicas melhores que as do concreto convencional.

As FC foram estudadas como substitutas do asbesto, já que se confirmou ser este responsável por sérios problemas à saúde, pontualmente, a doença asbestose (MOSLEMI, 1999). Placas corrugadas de fibrocimento usando fibras de coco foram produzidas e caracterizadas por Paramasivam *et al.* (1984), os quais concluíram que a sua eficiência era semelhante àquela obtida com o asbesto.

Khedari & Watsanasathaporn & Hirunlabh (2005) investigaram materiais de construção leves, contendo cimento, areia e fibras de resíduos de coco jovens. Observaram a redução da condutividade térmica e a diminuição da densidade do compósito, sem comprometer as características necessárias à sua utilização; recomendando seu uso em paredes e telhados.

2.2.1.2 Fibras orgânicas de sisal

O sisal é uma fibra ligno-celulósica leve e atóxica, FS, originada no México e denominada assim devido a uma erva nativa chamada Zizal-Xiu, ao nome de um povoado e ao porto por onde a fibra era exportada (MEDINA, 1959). Atualmente, segundo a CONAB, o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo, com, aproximadamente, 111 mil t anuais.

As FS são extraídas das folhas na forma de feixes, variando de 0,40 a 2 m de comprimento e 8 a 10 cm de largura, com secção angular ou quase cilíndrica, mais espessas na base e de coloração branco-creme (MATTOSO *et al.*, 1997; LI *et al.*, 2000). A sua extração é feita por corte e desfibramento, seguindo a lavagem, secagem e limpeza.

A composição química média para as FS varia de 65,8 a 85,2% de celulose; 6,6 a 13,0% de hemicelulose; e 7,0 a 12,0% de lignina (MEDINA, 1954; MWAIKAMBO & ANSELL, 2002; MARTIN *et al.*, 2009). De acordo com MARTIN *et al.* (2009), ocorre a diminuição de lignina (35%) e de hemicelulose (33%) ao longo da fibra, da parte basal para a apical, assim como aumento da quantidade de celulose (10%), nas mesmas regiões. A variação de valores relatada na literatura para as propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e porcentagem de alongamento) está correlacionada aos componentes químicos estruturais e ao diâmetro das fibras (LI *et al.*, 2000; MISHRA *et al.*, 2004), assim como à orientação das microfibrilas e cristais de celulose, e o número, comprimento e largura das células unitárias (REDDY & YANG, 2005).

As FS apresentam altos percentuais de celulose, sendo então, indicadas e justificadas como material de reforço em compósitos, também pelo baixo custo de extração das plantas e alto poder de reciclagem envolvido no processo de manufatura (BELAADI *et al.*, 2013). Possuem as seguintes características (KURUVILLA *et al.*, 1999; FROLLINI *et al.*, 2004): i) são biodegradáveis, sendo produzidas de fonte renovável; ii) possuem a facilidade de se modificar superficialmente devido a sua textura, permitindo uma boa aderência de contato; iii) têm alta tenacidade; iv) possuem boas propriedades de isolamentos térmicos e acústicos, com elevada resistência ao calor; v) possuem menor custo quando

comparado à fibra de vidro; e, vi) têm excelente resistência à abrasão, especialmente em equipamentos e moldes.

As FS têm sido estudadas como substitutas ao asbesto, haja vista a proibição do seu uso na fabricação de laminados à base de cimento. Lima *et al.* (2007) produziram placas laminadas de argamassa reforçadas com fibras longas de sisal e verificaram o comportamento quanto à flexão. O resultado do material com 3% de fibras de sisal apresentou o melhor comportamento. No entanto, em todos os casos, houve aumento da capacidade de absorver energia, da resistência à flexão pós-fissuração e da deflexão última do material.

Fibras curtas de sisal e coco foram estudadas por Toledo Filho *et al.* (2005) em compósitos com argamassa de cimento. Verificou-se que a adição de 0,2% de fibras de 25 mm, em volume, retarda o início do processo de fissuração pela contenção da contração plástica, conseguindo-se assim, controlar o desenvolvimento de fissuras em compósitos com pouco tempo de uso.

2.2.2 Cinzas de casca de coco verde

O coco, fruto do coqueiro, de nome científico *Cocos nucifera linn*, é uma drupa, ou seja, um fruto carnoso com apenas uma semente. A sua estrutura é formada por uma epiderme lisa de nome epicarpo, que envolve o mesocarpo espesso e fibroso, e no seu interior o endocarpo, que é uma camada muito dura; além da semente (NOGUEIRA, 2000); conforme .FIGURA 2.

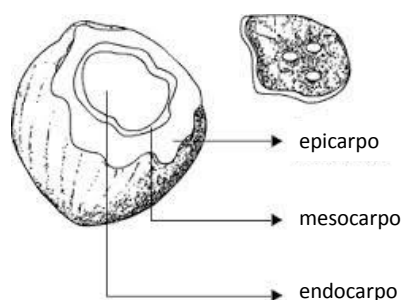


FIGURA 2 – FRUTA DO COQUEIRO E SUAS PARTES (AMBIENTE BRASIL, 2014)

As cinzas deste fruto são obtidas após a queima, que ocorre pela sua combustão em atmosfera natural de oxigênio. O poder calorífico superior das cinzas de casca do coco verde está em torno de 23 MJ/kg (base seca), segundo Nogueira (2000); e a composição elementar desse tipo de biomassa compreende 48,23% de carbono; 5,23% de hidrogênio; 33,19% de oxigênio; 2,98% de nitrogênio; 0,12% de enxofre; e 10,25% de outros elementos. É importante salientar que a composição química da casca de coco varia de acordo com a região de cultivo, o tipo de solo, a época do ano e a quantidade de chuva (KÄMPF & FERMINO, 1999).

Na literatura, somente Milani *et al.* (2009) pesquisaram a potencialidade físico-mecânica da cinza residual de casca de coco verde para utilização como pozolana em materiais cimentícios. Observaram que quanto maior foi a incorporação de cinza de casca de coco verde, menores foram os valores de resistência à compressão. Entre as idades de 28 e 60 dias, independente do teor de cinza de casca de coco verde, verificou-se um aumento significativo dos valores de resistência, porém as resistências das argamassas adicionadas de cinza de casca de coco verde não alcançaram a resistência apresentada pela argamassa padrão. Para os autores, isto indicou que a cinza de casca de coco verde atuou apenas como retardador do processo de hidratação dos compostos cimentantes e que, provavelmente, não possui propriedades pozolânicas.

Acréscimo da resistência à compressão, maior durabilidade e maior resistência à penetração dos cloretos são alguns exemplos de um melhor desempenho do concreto pela utilização de outro material orgânico natural que é a cinza de casca de arroz. Entre os trabalhos que comprovaram estas melhorias, têm-se:

- Prado *et al.* (2009) analisaram as propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz moída e sem moer em 10% na massa de cimento. Foi constatado que o desempenho do traço de concreto com a cinza de casca de arroz obtida sem controle de temperatura e sem uma moagem específica, foi igual ou superior àquela moída (resistência à compressão, 5,9% superior; resistência à tração, 16,4% superior e, 0,8% inferior no módulo de elasticidade).

- Vasconcelos & Akasaki (2010) investigaram a durabilidade de concretos de alto desempenho produzidos com resíduos de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento CPV ARI e borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo. O estudo indicou que a durabilidade destes concretos submetidos aos diversos processos de degradação (ação da água, temperatura, sais e solução ácida) não foi comprometida, considerando resistência mecânica, frente de penetração de cloretos e desgaste superficial por abrasão.
- Sokolovicz *et al.* (2009) verificaram a viabilidade de se produzir concreto estrutural com substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz “in natura” nos teores de 15% e 25%, investigando as influências sobre a durabilidade, propriedades mecânicas e microestrutura desses concretos. A sua utilização proporcionou uma maior resistência frente à penetração de íons cloretos. Quanto à resistência à compressão axial, a substituição de 25% do cimento por cinza de casca de arroz natural nos concretos, evidenciou valores cerca de 30% menores, quando comparados ao concreto feito somente com cimento como material aglomerante. Já para o teor de 15% de CCA natural, os resultados indicaram a viabilidade técnica da utilização desse resíduo, com menor custo devido ao seu não beneficiamento para ser utilizado.

A pesquisa de Kanning *et al.* (2014), que produziu cinza da folha de bananeira e a utilizou como insumo em argamassas e concretos, substituindo o cimento, apresentou um excelente desempenho mecânico e quanto a durabilidade. A resistência à compressão axial em concretos com adição de 10% da cinza de banana foi 25% superior ao concreto referência.

A folha de bananeira apresenta atividade pozolânica quando calcinada a uma temperatura de 850 °C, sob fluxo de ar, e tempo de queima de uma hora. A granulometria da cinza resultante pode ser ajustada para a mistura em argamassa e concreto em moinho de bolas (KANNING, 2010).

Tal como as cinzas citadas, segundo John *et al.* (2003), qualquer cinza vegetal, desde que em estado amorfo, finura adequada e composição química com elevado teor de sílica podem ser empregados como adição mineral (JOHN &

CINCOTTO & SILVA, 2003). A adição mineral não só diminui o custo da produção de concretos e argamassas, por serem energeticamente mais econômicos, como propicia a redução da reação álcali-agregado e do calor de hidratação gerado pelos cimentos (OLIVEIRA & BARBOSA, 2006).

2.3 FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA

A contaminação ambiental tem sido apontada como um dos maiores problemas da sociedade moderna. Como resultado de sua crescente conscientização, novas normas e legislações cada vez mais restritivas têm sido adotadas a fim de minimizar o impacto ambiental. No Brasil, este controle ainda é insuficiente e a ausência de processos de tratamento adequados é uma realidade. Industrialmente, ou estes são muito caros ou são ineficientes em curto espaço de tempo. Os processos oxidativos avançados (POA) são alternativas ao tratamento de resíduos ambientais, uma vez que por seus intermédios se é capaz de converter poluentes em espécies químicas inócuas, tais como gás carbônico e água, além de serem mais sustentáveis em longo prazo (NOGUEIRA & JARDIM, 1998). A sua grande vantagem reside no fato do contaminante não ser simplesmente transferido de fase, mas sim, degradado a partir de uma série de reações químicas.

O termo POA é usado para definir o processo em que os radicais oxidantes altamente reativos em solução aquosa, em particular o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$) com potencial-padrão de redução de 2,77 V, são gerados em quantidades suficientes para degradar compostos poluentes, a partir da combinação de diferentes oxidantes químicos com uma fonte de irradiação (NAGEL-HASSEMER & CORAL & LAPOLLI, 2012). Esses processos podem ser classificados em dois grupos: os que envolvem reações homogêneas, usando H_2O_2 (peróxido de hidrogênio), O_3 (ozônio) e/ou radiação ultravioleta (UV), e os que empregam catálises heterogêneas (NOGUEIRA & JARDIM, 1998). Alguns exemplos de POA podem ser citados (LOVEIRA *et al.*, 2012; UMAR & RODDICK & LINHUA, 2014; SANTIAGO-MORALES *et al.*, 2012; GIROTO *et al.*, 2006): oxidação catalítica, utilizando semicondutores como o TiO_2 , processos envolvendo H_2O_2 e O_3 , e as reações de Fenton e foto-Fenton (decomposição catalítica de peróxido de hidrogênio em meio ácido).

Entre os POAs, a fotocatalise heterogênea tem sido amplamente estudada principalmente nas últimas duas décadas. Entre as diversas publicações referentes à fotocatalise, uma série de revisões aborda a aplicação do processo à descontaminação ambiental. Entre os autores que comprovaram a despoluição do ar com o uso da fotocatalise estão: Poon & Cheung (2007), Hüsken & Hunger & Brouwers (2009), Jin *et al.* (2009), Du *et al.* (2011) e Visinescu *et al.* (2005), os quais provaram ser possível decompor e/ou oxidar NO_x , SO_x , NH_3 e compostos orgânicos nocivos à saúde (benzeno, tolueno, acetona, etc.) e transformá-los em substâncias menos reativas. Aplicações em escala laboratorial mostraram que é possível reduzir em até 63% o teor de tolueno (DEMEESTERE *et al.*, 2008); e até 80% o teor de NO_x (MAGGOS *et al.*, 2008). Na construção civil o uso desta técnica teve início na década de 1990, no Japão, quando as empresas e as universidades iniciaram os testes em concretos e em placas cerâmicas (IEA, 2009). Desde então, o interesse pela sua aplicação a outros materiais tem crescido em todo o mundo, principalmente, por conta do potencial de tornar as superfícies autolimpantes e por possibilitar a transformação de partículas poluentes em compostos menos agressivos e sais minerais.

Em 1972, Fujishima e Honda descobriram a cisão fotocatalítica da água em eletrodos de TiO_2 . Este evento marcou o início de uma nova era da fotocatalise heterogênea; desde então, pesquisadores trabalham para entender o processo fundamental e a sua eficiência fotocatalítica. Nos últimos anos, as aplicações para a remoção de impurezas ambientais são as áreas mais ativas da fotocatalise heterogênea. Isto é possível devido ao grande potencial de aplicação dos compostos baseados no TiO_2 utilizados para a destruição total de compostos orgânicos do ar e água poluídos (LINSEBIGLER & LU & YATES JR., 1995).

Para Zhao & Yang (2003), o princípio da fotocatalise heterogênea envolve a ativação de um semicondutor inorgânico por luz UV, solar ou artificial em comprimento de onda abaixo de 400 nm. Por definição, semicondutores são materiais sólidos que apresentam condutividade elétrica intermediária, entre 10^{-6} e $10^4 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, não tão alta quanto a dos metais e nem tão baixa como a dos isolantes, e as propriedades elétricas desses materiais são extremamente sensíveis à presença de muito pequenas concentrações de impurezas. Um semicondutor é caracterizado pela banda de valência (de menor energia), banda de condução (mais

energética) e a energia da banda de “gap” (diferença de energia que separa as bandas de valência e de condução), além do potencial padrão de redução (LACEY & SCHIRMER, 2008 APUD MELO, 2011).

Na FIGURA 3, tem-se uma representação esquemática de uma partícula de um semicondutor que realiza a fotocatalise, ou seja, catálise que utiliza fótons. O semicondutor sob irradiação propicia que os seus elétrons da banda de valência recebam energia suficiente (superior à energia de *banda de gap*) para os excitá-los, transpondo a lacuna de energia do semicondutor, propiciando, desta forma, ser transferidos para a banda de condução, gerando concomitantemente uma ou mais lacunas (h^+) na banda de valência. Estas lacunas apresentam potenciais bem positivos, entre +2,0 e +3,5 V, valores estes suficientes para gerar radicais hidroxilas a partir de moléculas de água adsorvidas na superfície do semicondutor, e portanto, capazes de catalisar reações químicas, oxidando os compostos orgânicos e reduzindo os metais dissolvidos ou outra espécies presentes (LACEY & SCHIRMER, 2008 APUD MELO, 2011).

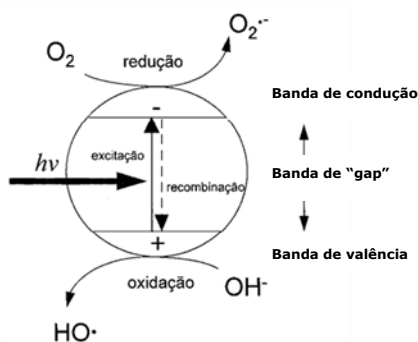


FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA PARTÍCULA DE UM SEMICONDUTOR NO PROCESSO DE FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA (ADAPTADO DE LACEY & SCHIRMER, 2008 APUD MELO, 2011)

Alguns semicondutores são mais comumente utilizados na fotocatalise heterogênea, entre eles: o sulfeto de cádmio, o dióxido de titânio, o óxido de estanho, o óxido de ferro, o óxido de tungstênio e o óxido de zinco. O TiO_2 é o fotocatalisador mais comumente utilizado devido à sua alta eficiência, preço acessível, ser quimicamente estável e, principalmente, ser de baixa toxicidade (DIAMANTI & ORMELLESE & PEDEFERRI, 2008).

O semicondutor TiO_2 pode ser encontrado na forma de três estruturas cristalinas, sendo estas: o anatásio, o rutilo e brokita. A forma anatásio, tetragonal, com E_{gap} de 3,23 eV é a que apresenta maior atividade fotocatalítica. Isto é explicado pela sua banda de condução ser mais negativa que a do rutilo (SUWA & INAGAKI & NAKA, 1984); a energia de “*band gap*” da forma rutilo é de 3,02 eV, valor este que possibilita uma maior frequência de recombinação elétron/lacuna (LITTER, 1999); e a fase anatásio é formada a temperaturas menores, favorecendo a formação de partículas com grande área superficial e com grande densidade de sítios ativos na superfície, obtendo assim, um maior rendimento quântico (HERMANN, 1999). O princípio de funcionamento do TiO_2 como fotocatalisador está baseado na geração do par elétron-lacuna positiva pela absorção de energia a partir de luz UV.

Entre as diversas formas de radiação, a luz visível e o calor são as mais facilmente observadas e sentidas, porém pode ser encontrada de outras maneiras, conforme o espectro eletromagnético da FIGURA 4 (DORNELLES, 2008).

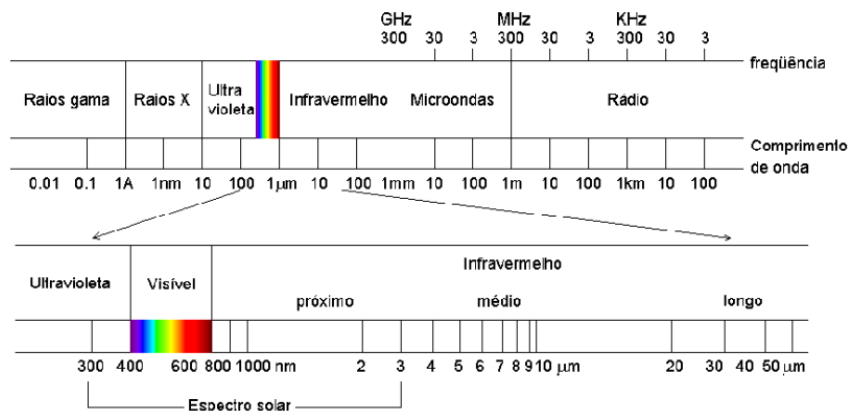


FIGURA 4 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO: REGIÕES E COMPRIMENTOS DE ONDA (DORNELLES, 2008)

O espectro eletromagnético abrange comprimentos de onda muito curtos, associados aos raios cósmicos, até grandes comprimentos de onda, de ondas de rádio de baixa frequência. A região do espectro eletromagnético entre 300 e 3000 nm representa o conjunto de radiações geradas pelo Sol, e compreende três regiões: ultravioleta, visível e infravermelho (DORNELLES, 2008). Segundo a “Environmental Protection Agency (EPA, 1999)”, a radiação ultravioleta, emitida na faixa de 100 a 400 nm, é aquela produzida em maior proporção pelo sol, no entanto,

é parcialmente absorvida pela camada de ozônio. Em termos didáticos, espectro de UV está dividido em quatro regiões: UV-A, com comprimento de onda entre 315 a 400 nm, sendo a que mais atinge a biosfera, e é onde ocorre pouca absorção pela camada de O₃ estratosférico; UV-B, com comprimento de onda entre 280 a 315 nm, é fortemente absorvida pelo O₃; UV-C, com comprimento de onda entre 200 a 280 nm, completamente absorvida pelo oxigênio (O₂) e O₃, não atingindo a superfície terrestre; e UV-V, comprimento de onda entre 100 a 200 nm. Segundo Santos (2007), o sol emite energia em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, sendo que do total, 38,5% se concentra no espectro visível de energia (entre 400 e 700 nm de comprimento de onda), 8,9% em UV (< 400 nm), 39% na região do infravermelho próximo (entre 700 e 1500 nm) e 12,6% no infravermelho (> 1500 nm). A radiação emitida acima da região das microondas e ondas de rádio, e abaixo da região UV, como raios-X e raios gama, é menor que 1%.

Entre as aplicações da técnica fotocatalítica com TiO₂ tem-se um trabalho de Gurol (2006) apresentado na Conferência Internacional de Edifícios, em 2004, onde foram demonstrados estudos do poder autolimpante de novos materiais construídos com TiO₂. Neste estudo de laboratório, as suas nanopartículas com aproximadamente 20 nm, na fase anatásio, foram misturadas com cimento, cal, areia e água, e foram então colocadas sobre placas de Petri de 10 cm para expor somente a parte superior ao ar. Um segundo material, construído a partir da mistura de partículas de TiO₂ com cimento e alguns enchimentos foi aplicado como uma tinta de 1 mm de espessura sobre uma argamassa em placas de Petri de 10 cm. Ambos os materiais continham a mesma quantidade de TiO₂ e foram curados sob a mesma temperatura, umidade e tempo de estocagem. Os pesquisadores desenvolveram uma câmara de testes de 1,5 L de volume e testaram o poder de remoção de NO₂ no ar com estes materiais desenvolvidos. Foi observado que o NO₂ é absorvido no material durante a fase escura, e com a radiação ele é então oxidado para NO₃⁻, o qual é recuperado por lavagem do material. Ambos os materiais testados mostraram 3 a 4% de eficiência de destruição de NO₂ em comparação com as amostras de referência sem TiO₂. Estes resultados indicaram que o NO₂ foi absorvido nos materiais de construção durante a noite e pode degradar por um processo fotocatalítico quando expostos à luz do dia seguinte. Contudo, estes resultados extremamente limitados não permitem extrapolações para estimar quanto NO₂ pode

ser removido do ar e quanto TiO_2 é necessário para ocorrer uma redução significativa de NO_2 em condições reais.

Em outro trabalho publicado no “Urban Air Quality Conference”, em Valência na Espanha, em 2005, os mesmos pesquisadores (GUROL, 2006) descreveram um estudo de laboratório em dois diferentes sistemas usados para oxidar NO e NO_2 (NO_x). O primeiro sistema consistia de uma câmara de vidro de 450 L iluminada por uma lâmpada de 300 W montada sobre a câmara. Dois tipos de materiais contendo TiO_2 foram testados: uma tinta mineral e uma tinta orgânica. A tinta mineral, que era essencialmente cimento Portland com alguns aditivos, e oriunda da Italcementi Co., foi acrescida de 3% de TiO_2 em peso. O segundo material foi uma base orgânica translúcida com siloxanos e ligantes, obtida da Millenium Chemicals, Inc. Este material foi acrescido de 10 ou 5% de TiO_2 na forma sol-gel (Wacker BS45). Estes materiais foram dispostos em placas de Petri e somente as superfícies superiores foram expostas. As placas ficaram expostas 50 cm abaixo das lâmpadas. A temperatura e a umidade foram controladas colocando-se a câmara em um compartimento metálico. O segundo sistema consistia de uma câmara em aço inoxidável com temperatura e a umidade controladas e com ventiladores para a circulação de ar. Uma lâmpada de 300 W foi colocada a 1,5 m do centro das quatro amostras de TiO_2 , cada uma com um vidro de 1 m^2 . A intensidade de UV variou entre 2,1 a $4,6 \text{ W/m}^2$, dependendo da localização. Para ambos os sistemas os valores de NO_x foram medidos continuamente no ar por um analisador de gases NO_x . Os resultados mostraram que os dois sistemas apresentaram significativa remoção de NO e NO_2 por efeito catalítico do TiO_2 nas condições testadas. Foi observado que o NO oxidou 20 a 100% mais rapidamente que o NO_2 . A mesma taxa de fotodegradação foi obtida com a tinta mineral, com 3% de TiO_2 nos dois sistemas. Contudo, a tinta orgânica translúcida apresentou uma taxa um pouco maior no sistema em laboratório com 10% de TiO_2 , e uma taxa muito pequena no sistema macro com 5% de TiO_2 do que a tinta mineral. Além disso, a tinta orgânica produziu ozônio como subproduto. A oxidação do NO também produziu NO_2 , o qual foi considerado um produto indesejável.

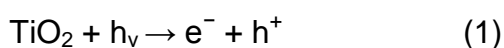
Em um trabalho realizado por Osburn (2008), o TiO_2 mostrou-se o mais prático semicondutor disponível para a fotocatalise, entre os conhecidos e testados (CdS , SnO_2 , WO_3 , SiO_2 , ZrO_2 , ZnO , Nb_2O_5 , Fe_2O_3 e SrTiO_3). Existe hoje um grande

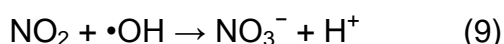
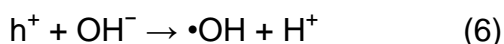
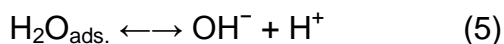
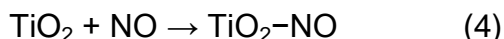
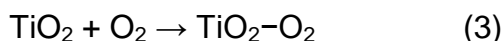
esforço mundial para aumentar o poder de oxidação fotocatalítica do dióxido de titânio. A técnica mais comumente aplicada é a dopagem do TiO_2 com outro elemento, e mais recentemente, com dois elementos. Por outro lado, um fator que deve ser considerado em fotocatalise, é o processo de preparação da superfície fotocatalítica, o qual altera significativamente a habilidade de fotocatalise. Teoricamente, todas as superfícies com TiO_2 apresentam características fotocatalíticas, porém, a eficiência de cada tipo de superfície ainda deve ser testada, para o surgimento de viabilidade técnica e de produtos comerciais.

As aplicações em pavimentos cimentícios em escala piloto já foram iniciadas em vários países como Japão, Itália, França, Bélgica e Holanda. Também, foram testadas aplicações em pavimentos de concreto e em pisos intertravados, *pavers*; os resultados confirmaram os dados obtidos em escala laboratorial com reduções de até 40% na concentração de NO_x nas vias onde foram utilizados produtos com propriedades fotocatalíticas (IEA, 2009).

Em outro trabalho, Melo *et al.* (2012), compararam a eficiência de blocos de pavimentação fotocatalítico (com TiO_2) em laboratório e após um ano em serviço. Também, os autores concluíram que a eficiência fotocatalítica dos blocos de pavimentação seria infinita; no entanto, estes, quando em serviço, são submetidos a agentes externos como o tráfego e a sujeira, que reduz tal capacidade. Também, se verificou que, quanto menos espessa a camada fotocatalítica, mais efetiva foi a oxidação dos gases NO_x . Isto é explicado pela maior área específica da textura superficial, o que significa uma quantidade maior de partículas de TiO_2 exposta, e portanto, uma maior eficiência do material.

Na literatura (CHEN & POON, 2009; HÜSKEN & HUNGER & BROUWERS, 2009; e MELO & TRICHÊS, 2012) está apresentado o mecanismo geral para a explicação da fotocatalise heterogênea dos NO_x , utilizando TiO_2 , que pode ser dividido em três etapas principais: (a) transporte e adsorção do poluente do ar NO_x para a superfície do catalisador; (b) reação fotocatalítica no catalisador; (c) oxidação do poluente NO_x e a produção de íons de nitrato na superfície. Nas Equações (1) a (9) estão apresentadas as representações esquemáticas:





Na Equação 1 está mostrada a geração de pares elétron (e^-)/lacuna (h^+) a partir da incidência do fóton ($h\nu$) de radiação UV-A no semicondutor TiO_2 ; ou seja, a absorção do fóton com energia igual ou superior à banda de gap no semicondutor resulta na transição eletrônica da banda de valência para a de condução com geração de uma lacuna na banda de valência. Nas Equações (2) a (4), estão apresentadas as adsorções dos reagentes H_2O (água), O_2 e NO_x no fotocatalisador. As moléculas de H_2O adsorvidas na superfície do semicondutor TiO_2 geram $\bullet\text{OH}$, mostrados nas Equações (5) e (6). A oxidação do NO_x está representada nas Equações (7) a (9), sendo o produto da degradação os íons de NO_3 , os quais são solubilizados pela umidade noturna ou pela ação da chuva.

2.4 DURABILIDADE

O estudo da durabilidade de estruturas de concreto deve considerar, não somente, os insumos utilizados na sua produção (agregados, cimento, aço), aspectos da mistura (fator água/cimento, uso de aditivos) e condições de construção (método de cura); mas, também, o ambiente em que ela será inserida (LIMA, 2011).

Os parâmetros que influenciam na degradação das estruturas de concreto são: temperatura, umidade relativa, vento, poluição, agressividade da água, entre outros. Cada variável interfere nas características do concreto de forma diferente. Almusallam (2001) constatou que a temperatura do ar, a umidade relativa e a velocidade do vento afetam as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Por exemplo, as altas temperaturas e a baixa umidade relativa aceleram a retração plástica do concreto, o que propicia o surgimento de tensões que geram

fissuras. Estas, por conseguinte, permitem a entrada de oxigênio e de umidade no material, condição avaliada como ideal para a degradação da estrutura por corrosão na armadura.

O concreto geralmente apresenta $\text{pH} > 13,5$ na solução dos poros, ou seja, é um material alcalino, o que confere alta resistência à corrosão da armadura pela presença da camada passiva no aço (SHAMSAD AHMAD, 2003). No entanto, quando a estrutura está exposta a agentes agressivos externos e internos, incorporados ao concreto ou gerados pelo meio ambiente, como os íons cloreto e sulfato, surge um fenômeno que é considerado um dos maiores problemas do concreto armado, a corrosão das armaduras (METHA & MONTEIRO, 2008).

O processo de corrosão da armadura envolve uma fase inicial, em que ocorre a entrada dos agentes agressivos, os quais modificam as condições do concreto no entorno da barra, despassivando o aço. Esta fase depende das características de agressividade do meio e dos materiais. Com a despassivação, existe a formação de uma célula de corrosão, a qual é responsável pela propagação do fenômeno, caracterizado pelo desenvolvimento de reações de corrosão.

A maior parte das pesquisas desenvolvidas e em desenvolvimento está no ambiente marinho devido à alta velocidade de ataque do sal tanto ao concreto quanto e quando presente, na armadura. Neste caso, são encontrados agentes físicos (vento, elevada umidade), químicos (sais agressivos) e biológicos (organismos encrustadores) que deflagram o processo de corrosão (LIMA, 2011).

Os íons cloreto podem ser encontrados na estrutura interna do concreto associados à fase alumino-ferrítica formando cloroaluminatos, adsorvidos fisicamente na superfície dos poros capilares ou livres na solução dos poros do concreto (FIGUEIREDO, 2011). Quanto aos íons sulfato, estes propiciam alterações na microestrutura quando da interação com o concreto como, por exemplo, o hidróxido de cálcio que em sua presença torna-se gipsita, monossulfato e pode ser convertido em etringita e o CSH que pode ser transformado em taumasita; e, isto, pode gerar expansão, fissuração/trincas e lascamento no concreto (BELLMANN *et al.*, 2012).

O uso de adições contendo materiais pozzolânicos no cimento e/ou concreto, como nitrato de cálcio, sílica ativa, cinza volante e escória de alto forno, com o

objetivo de prevenir e/ou reduzir a corrosão, está aumentando a cada dia (TOPÇU & BOGA, 2010).

Jau & Tsay (1998), Yeau & Kim (2005) e Pal *et al.* (2002) avaliaram as propriedades de resistência à corrosão em concretos produzidos com escória de alto forno confirmando que esta substituição propicia o aumento da resistência à corrosão do aço. As adições minerais melhoram o refinamento dos poros e a diminuição da interconexão entre os mesmos, reduzindo assim a permeabilidade e a entrada de agentes agressivos (GASTALDINI & ISAIA, 1998).

A adição de materiais pozolânicos ao cimento influencia positivamente na diminuição do processo de penetração de cloretos, no aumento da resistividade elétrica do concreto, na diminuição do tamanho dos poros e na menor intensidade de corrosão (AL-AMOUDI, 2002). A comparação feita por Al-Amoudi *et al.* (1992) entre diversos cimentos, com e sem adição de escória, resultou em intensidade de corrosão dez vezes inferior para o cimento com a adição.

Entre as técnicas mais utilizadas para a avaliação do risco de corrosão tem-se a do potencial de corrosão, que consiste na medição da diferença de potencial elétrico entre o aço da armadura do concreto e um eletrodo de referência (capaz de manter seu potencial elétrico estável). É uma técnica eletroquímica não destrutiva, qualitativa e normalizada pela ASTM C876 (1991), que indica a probabilidade de o material estar em processo de corrosão.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na produção do concreto convencional foram:

a) cimento Portland composto com adição de pozolana com resistência mecânica à compressão de 32 MPa (CP-II Z 32), devido à sua larga utilização em obras de construção civil, concreto simples, armado e protendido e, também, em elementos pré-moldados e artefatos de cimento do setor elétrico;

b) agregado miúdo natural;

c) agregado graúdo oriundo de rocha britada com dimensão máxima de 9,5 mm; e a

d) água potável para o amassamento, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Curitiba-PR.

Na produção dos concretos com adições ou substituições foram empregados os seguintes insumos e suas respectivas origens:

- fibra de coco (FC), adquirida na Caleffi e Freitas Indústria, Comércio e Beneficiamento de Coco Ltda, Nísia Floresta/RN;

- fibra de sisal (FS), adquirida na Sisalsul Indústria e Comércio Ltda, São Paulo/SP;

- coco verde, para obtenção das cinzas, adquirido no Rei do Coco, Curitiba/PR; e o

- dióxido de titânio, AEROXIDE® TiO_2 P₂₅ em pó, fase predominante anatásio, com distribuição média das partículas de 21 nm e área superficial de $(50 \pm 15) \text{ m}^2/\text{g}$, segundo a especificação da Evonik Industries.

Parte destes insumos foi previamente preparado para a utilização ao longo da pesquisa. As metodologias utilizadas estão descritas na sequência.

3.1.1 Preparação dos insumos

Fibras de coco e sisal. As fibras orgânicas de coco e sisal foram cortadas em moinho de facas, marca NZ Philpolymer e modelo JHL-240 (FIGURA 5), sendo utilizado um comprimento médio de 10 mm, de modo a padronizar o procedimento experimental de dosagem.

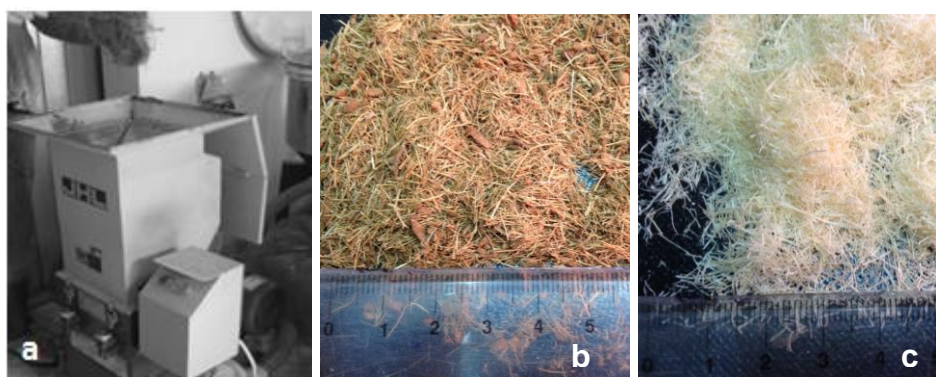


FIGURA 5 – FOTOS ILUSTRATIVAS: a) DA MÁQUINA DE CORTE DAS FIBRAS, b) DAS FIBRAS NATURAIS DE COCO; e c) DAS FIBRAS NATURAIS DE SISAL

As características das fibras foram investigadas com e sem tratamento alcalino. Este tratamento consistiu na imersão e na agitação mecânica das fibras moídas em solução de 1% de NaOH por uma hora. Após, as fibras foram lavadas com água, a fim de remover todas as impurezas e as substâncias solúveis provenientes do tratamento químico. E, para finalizar a preparação, as fibras foram secas em estufa a 60 °C por 24 h. Este tratamento de alcalinização foi adaptado de diferentes pesquisas (MULINARI *et al.*, 2011; GU, 2009; FIORE & DI BELLA & VALENZA, 2015).

Cinza de casca de coco verde, CC. As cascas de coco verde para a obtenção da CC foram inseridas, ainda úmidas, em um forno elétrico e mantidas nas temperaturas de 400 °C e 550 °C, a fim de se verificar a eficiência da queima em relação à estrutura formada. Após este pré-tratamento, as amostras foram calcinadas em mufla por intervalos de tempo (entre 1 a 4 h, a cada hora) e sob diferentes temperaturas (de 600 °C a 900 °C, a cada 100 °C).

Os dados resultantes de composição química e das fases presentes, se cristalina ou amorfa, obtidos pelas análises de difratometria de raios X (XRD) e de termogravimetria (TGA) das CC nos diferentes tempos e temperaturas mencionados, indicaram os melhores parâmetros de processamento. Assim, optou-se pela queima da casca do coco verde e da CC nas temperaturas de 550 e de 900 °C, e nos tempos de 6 h e uma hora, respectivamente.

Em relação ao rendimento, foram utilizados aproximadamente 120 kg de casca de coco verde (100 unidades) para obtenção de 1 kg de CC.

A fim de obter uma cinza com finura apropriada para a utilização em substituição parcial ao cimento na produção de concretos, o material foi processado em moinho de bolas da Tecnal de 17,6 cm de diâmetro, onde foram utilizadas bolas de alumina com diâmetro de 2,12 mm. A moagem foi realizada com velocidade de 60 rpm, e por ciclo, compreendeu 1,5 kg de CC por um período de 12 horas.

3.1.2 Caracterização dos insumos

As caracterizações física, química e mecânica dos insumos foram verificadas segundo as normas brasileiras da ABNT e outras referências, a fim de assegurar a conformidade do material, não ocasionando interferências nas propriedades do concreto e, portanto, do produto final.

Cimento. O cimento foi caracterizado por análises físico-químicas, realizadas de acordo com as normas brasileiras. O objetivo básico foi identificar os compostos químicos presentes, incluindo aqueles que influenciam na vida útil das estruturas de concreto em função do tempo (tais como álcalis, Na_2O e K_2O , CaO livre, MgO e SO_3), além de verificar se o produto se encontrava dentro do especificado pelo fabricante. Sendo assim, esta etapa foi realizada conforme as seguintes normas técnicas:

- NBR NM 13/12 - teor de CaO livre;
- NBR NM 15/12 - resíduo insolúvel;
- NBR NM 18/12 - perda ao fogo;
- NBR NM 22/02 - análise química;
- NBR NM 23/01 - massa específica;

- NBR NM 43/03 – consistência normal;
- NBR NM 65/03 - tempos de pega;
- NBR 7215/97 – resistência à compressão;
- NBR 11578/91 – cimento Portland composto – especificação;
- NBR 11579/12, NBR 12826/93 e NBR NM 76/98 – finura;
- NBR 11582/12 – expansão a frio;
- NBR 14656/01 – composição química pela técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (XRF).

Agregados. Os agregados miúdo e graúdo foram caracterizados fisicamente de acordo com a NBR 7211/09. Foi obtida a caracterização química do agregado miúdo pela técnica de XRF, em equipamento espectrômetro PANalytical Axios Max; e a caracterização petrográfica do agregado graúdo foi investigada pela análise microscópica em microscópio petrográfico Carl Zeiss e em sistema de captura e tratamento de imagem AxioVision.

Fibras de coco e sisal. Como principais características foram determinadas a massa específica pelo método do picnômetro, segundo a norma D2320 (ASTM, 2012) e a resistência mecânica à tração em máquina universal de ensaios da marca INSTRON modelo 4467 dotada de célula de carga de 100 N. A fibra foi presa por garras e efetuada a medição a uma velocidade de 5 mm/min. Também, foi feita a análise termogravimétrica a fim de verificar o comportamento das FC e de FS em atmosfera inerte de N₂ com taxa de aquecimento de 20 °C/min na faixa compreendida entre 25 e 900 °C.

Cinza da casca de coco verde. A CC foi caracterizada pelas técnicas de XRF, XRD e TGA. A primeira foi utilizada para determinar a composição química elementar em um equipamento espectrômetro PANalytical Axios Max, já o XRD foi utilizado para identificar as fases químicas contidas na CC por intermédio dos cartões de referência do “International Centre for Diffraction Data (ICDD)”, adotando a radiação CuK α , com comprimento de onda de 1,54056 Å, varredura angular 2 θ , tensão elétrica de 40 kV e corrente elétrica de 40 mA. A análise termogravimétrica foi realizada em um analisador termogravimétrico da marca Netzsch em atmosfera inerte de N₂ com taxa de aquecimento aplicada de 10 °C/min e a varredura de 25 a 1200 °C, utilizando os programas STA 449 F3 e o OPUS 6.5. O objetivo foi

determinar o equivalente em perda ou ganho de massa do material na faixa de temperatura de trabalho. Obteve-se, também, o índice de atividade pozolânica com a cal e o cimento (NBR 5751/92 e NBR 5752/92), a massa específica (NBR NM 23/01) e a superfície específica da cinza. Esta última característica foi feita por dois métodos, o de permeabilidade ao ar (Blaine) segundo a norma NBR NM 76/98 para cimentos, e o método de adsorção de gás utilizando N₂ líquido e gasoso, onde o material permaneceu sob vácuo por 2h à temperatura de 100 °C. Esta análise foi realizada com auxílio de um porosímetro da marca QuantaChrome modelo NOVA 1200, e os dados exportados para o software Autosorb.

Dióxido de titânio. A caracterização da substância fotocatalítica foi realizada a partir das técnicas de XRD, de modo a identificar a fase cristalina predominante e o tamanho médio do cristalito; e a microscopia eletrônica de varredura (SEM) com microsonda analítica de raios X (EDS) para a análise das características microestruturais.

A determinação do tamanho médio dos cristalitos foi efetuada utilizando a equação de Scherrer a partir do pico de difração de maior intensidade. A fórmula é: tamanho médio do cristalito = $K\lambda/(B_{1/2} \cdot \cos \theta)$, sendo K, o fator da forma do cristalito, considerando-se um material particulado, suas partículas, na sua maioria, possuem textura esférica, assim, o valor correspondente médio utilizado foi de 0,90 (YAM *et al.*, 2011); λ , o comprimento de onda do feixe de raios X, neste caso, um tubo convencional de raios X com alvo de cobre, $\text{CuK}\alpha = 1,5406 \text{ \AA}$; $B_{1/2}$, o valor da base a meia altura em radianos; e θ , o valor do ângulo de maior intensidade.

Adicionalmente, foram efetuados ensaios para a determinação do potencial fotocatalítico do TiO₂ para oxidação dos gases NO_x e SO₂. O sistema compreendeu a percolação do gás (NO_x e SO₂, com concentração inicial de 400 ppb) por uma coluna impregnada com a substância fotocatalítica TiO₂, a qual foi preenchida anteriormente com graxa de silicone nas paredes e algodão na extremidade. A medição da concentração do gás gerado foi realizada com auxílio de um monitor de ar ambiente, marca HORIBA. Este procedimento está ilustrado na FIGURA 6.



FIGURA 6 - SISTEMA DE ANÁLISE UTILIZADO PARA DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL FOTOCATALÍTICO DO TiO_2 FRENTE AOS GASES NO e SO_2

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Dosagens de Concreto

Os estudos de dosagens foram realizados a partir de um padrão de referência, ou seja, um concreto somente com os constituintes básicos, sem adições e sem aditivos, possibilitando a verificação do comportamento de concretos com as adições e substituições.

O traço do concreto convencional, ou seja, de referência (REF) foi definido como 1: 1,48: 2,52: 0,50 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: fator água/cimento), segundo o método de dosagem do módulo de finura dos agregados (ANDRADE *et al.*, 1981), considerando dados de resistência à compressão, fator água/cimento (a/c) e consumo de cimento. A quantidade de cimento utilizado por m^3 de concreto foi de 425 kg. Este traço foi, também, definido pelos valores médios normalmente encontrados nas fábricas de artefatos de concreto para a produção de postes e outros artefatos para as redes de distribuição de energia elétrica.

Como itens de controle para a produção do material, foi estabelecido o “slump” de (30 ± 10) mm no ensaio de abatimento do tronco de cone, valor este devido a grande empregabilidade em fábricas de artefatos de concreto, além de testes de resistência mecânica à compressão axial, que obrigatoriamente devem apresentar resultados iguais ou acima de 25 MPa após os primeiros 28 dias de cura úmida (NBR 8451-1/2011).

Considerando a curva de distribuição normal, onde existe a probabilidade de 5% dos CPs não atingirem o valor da resistência mínima, a resistência característica do concreto à compressão foi a estimada. De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2006), este valor é obtido pela resistência do concreto verificada no equipamento diminuindo 1,65 vezes o desvio padrão (S_d), o qual é atribuído às condições de preparo do concreto (para esta pesquisa, condição A, resultando em S_d de 4,0). Desta forma, o valor mínimo da resistência à compressão axial foi de 31,6 MPa.

As dosagens com adições e/ou substituições foram executadas de duas maneiras: substituição ao cimento em massa para a CC, sem considerar a massa específica; e, como adição em volume de concreto as fibras orgânicas de coco e sisal. Os valores de insumos empregados, em massa, foram: 3, 5 e 8,5% para a CC; e 0,6; 0,8 e 1,0% para as FC e FS, os quais foram determinados a partir de outros trabalhos (RAMAKRISHNA & SUNDARARAJAN, 2005; SILVA *et al.*, 2008; KANNING *et al.*, 2014) e testes de laboratório.

O concreto com camada fotocatalítica foi obtido pela aplicação, com pincel, de uma camada superficial de argamassa na proporção de 1:3 (cimento:areia), com substituição do cimento por 30% de TiO_2 (em relação à massa, e a/c de 1,2) nos CPs produzidos com o traço do REF. Esta porcentagem foi determinada a partir dos resultados obtidos no estudo fotocatalítico com o gás NO_x (FIGURA 105), que envolveu a caracterização de argamassas contendo 0, 5, 10, 20, 50, 70 e 90% de TiO_2 , em substituição ao cimento.

A moldagem dos CPs para os diversos ensaios e a cura úmida com temperatura controlada de (23 ± 2) °C e umidade relativa mínima de 95% foram realizadas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2003).

3.2.2 Caracterização do Concreto

Resistência mecânica. Os testes envolvidos na caracterização mecânica dos materiais desenvolvidos foram: resistência à compressão axial simples, resistência à tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade. Os CPs de concreto foram ensaiados na máquina universal de ensaios marca EMIC, modelo

DL 30.000, de acordo com as normas técnicas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 7222 (ABNT, 2011) e NBR 8522 (ABNT, 2008).

Para a medida da resistência à compressão axial simples foram moldados 2 CPs para cada uma das idades de cura, entre elas: 1, 3, 7, 14, 28 e 91 dias; para o teste de resistência à tração por compressão diametral foram 2 CPs e para o módulo de elasticidade foram 3; todos com dimensões de (10 x 20) cm. Os mesmos foram mantidos em cura úmida até a data da ruptura, seguindo as normas brasileiras.

Especificamente para os concretos reforçados com fibras (melhor desempenho mecânico entre as porcentagens) e, comparativamente ao REF, foram determinadas as propriedades de resistência à abrasão, ao impacto e à flexão, a fim de verificar o comportamento destes materiais e a eficiência das fibras como material de reforço. Estes ensaios foram os escolhidos de forma a verificar se há algum efeito benéfico das fibras orgânicas de modo a confrontar ou corroborar com os dados apresentados na literatura (SILVA *et al.*, 2008b; RAMAKRISHNA & SUNDARARAJAN, 2005).

O ensaio de abrasão hidráulica foi realizado em 2 CPs cilíndricos (30 x 10) cm, aos 28 dias de idade, de acordo com a norma C 1138M (ASTM, 2012). No método se utilizam esferas de aço com diâmetros variados como carga abrasiva para determinar o desgaste do material ao longo de 72 h.

A caracterização deste desgaste superficial foi feita pelas medidas de profundidade das erosões causadas no ensaio de abrasão, com auxílio de um paquímetro de precisão e uma placa de acrílico, perfurada a cada centímetro. Os resultados estão apresentados também em gráficos esquemáticos 3D.

A caracterização dos materiais quanto à resistência à tração na flexão foi realizada segundo a NBR 12142 (ABNT, 2010), enquanto a resistência ao impacto foi determinada a partir da NBR 15845 (ABNT, 2010) adaptada; ambos os ensaios foram executados aos 28 dias de cura úmida.

Para o ensaio de resistência ao impacto, foram moldados 5 CPs prismáticos (tipo placas) de (20 x 20) cm de base e 5 cm de espessura. O aparato utilizado, ilustrado na FIGURA 7, foi composto de uma caixa de areia, um tubo de PVC com comprimento de 2,30 m e uma esfera metálica com massa de 0,5 kg ligada a um

cordão no interior do tubo e conectado por uma roldana. Após o CP centralizado e nivelado no colchão de areia, a esfera metálica foi abandonada em queda livre de uma altura inicial de 30 cm (entre a face do CP e o centro da esfera), com intervalos crescentes de 5 cm de altura, até que ocorreu a ruptura do CP de concreto.



FIGURA 7 – APARATO UTILIZADO NO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO, CONTENDO CAIXA DE AREIA, TUBO DE PVC E ESFERA METÁLICA LIGADA A UM CORDÃO COM ROLDANA.

A resistência ao impacto foi determinada para o surgimento da primeira fissura e quando da ruptura do CP. A equação utilizada para a obtenção da energia de impacto envolve a multiplicação da altura de queda (em metro), a massa da esfera (em kg) e a aceleração da gravidade (em m/s^2).

Propriedades físicas. A massa específica, o teor de absorção de água por imersão e o índice de vazios foram medidos segundo recomendações da norma NBR 9778 (ABNT, 2005), enquanto o ensaio de permeabilidade foi realizado segundo a metodologia da NBR 10786 (ABNT, 2013). Pelo ensaio de lixiviação se objetivou verificar a liberação de quaisquer compostos tóxicos, por cromatografia gasosa, iônica e a análise de metais pesados.

Durabilidade. Os CPs para o acompanhamento da durabilidade foram moldados nas mesmas condições do concreto em estudo, em formato prismático com dimensões de (9 x 5 x 10) cm, sendo dotados de barras metálicas confeccionadas a partir de vergalhões nervurados de aço carbono CA 50 de 6,3 mm de diâmetro nominal e 12,5 cm de comprimento, conforme mostrado esquematicamente na FIGURA 8. Estas barras metálicas foram polidas em esmeril, e encapadas com fita de autofusão para a padronização, ou seja, eliminou-se a camada de carepa de laminação existente e delimitou-se a área central de 6,43 cm² como região a ser corroída.

Os CPs foram curados inicialmente ao ar livre por 24 h protegidos com filme plástico, após 28 dias em cura úmida com umidade relativa superior a 95% e temperatura controlada em $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

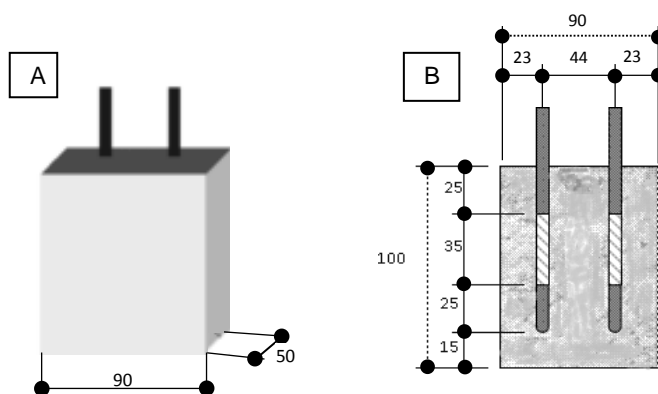


FIGURA 8 – A) DESENHO ESQUEMÁTICO DO CP PRISMÁTICO PARA O ENSAIO DE DURABILIDADE; B) DETALHE INTERNO DAS BARRAS COM AS DIMENSÕES DE EXPOSIÇÃO EM MILÍMETROS

O estudo de durabilidade foi baseado no envelhecimento acelerado dos CPs de concreto em câmaras de intemperismo (FIGURA 9), submetidos a ciclos de molhagem, secagem e de temperatura de até 40 °C. Nestes ensaios, foram utilizadas atmosferas agressivas tanto de névoa salina (5% NaCl) e quanto de gás anidrido sulfuroso (SO₂ – 2%) de forma a simular as condições do meio industrial e marinho, conforme os parâmetros das normas G 87 (ASTM, 2007) e B 117 (ASTM, 2011). Para uma análise comparativa, alguns CPs foram acondicionados em dessecador, tornando-se esta condição como referência.



FIGURA 9 - FOTOS ILUSTRATIVAS DAS CÂMARAS DE INTEMPERISMO ARTIFICIAL: a) CÂMARA COM GÁS ANIDRIDO SULFUROSO (SO_2); E b) CÂMARA DE NÉVOA SALINA CÍCLICA

A durabilidade relativa dos materiais foi acompanhada em função das alterações nas suas propriedades elétricas, por meio da técnica de potencial de corrosão da armadura em equipamento potenciostato/galvanostato da marca Ecochemie, modelo AUTOLAB - PGSTAT100 com software FRA. As medições do potencial de circuito aberto (OCP) foram efetuadas em CPs úmidos no tempo de 60 s.

O sistema utilizado para medição, ilustrado na FIGURA 10, consistiu do CP de concreto com a barra metálica como eletrodo de trabalho (ET), o eletrodo de cobre/sulfato de cobre – $\text{Cu}|\text{CuSO}_4$ (CSE) como eletrodo de referência (sendo este colocado sobre a superfície do concreto sobre uma esponja umedecida com água) e o contraeletrodo (CE) de grafite.

Os valores obtidos de potencial eletroquímico foram avaliados de forma qualitativa segundo a norma C 876 (ASTM, 2009), indicando a probabilidade de o concreto armado estar em processo de corrosão. Estes resultados foram representados graficamente em potencial de corrosão (referenciado ao eletrodo de CSE) em função do tempo de envelhecimento.

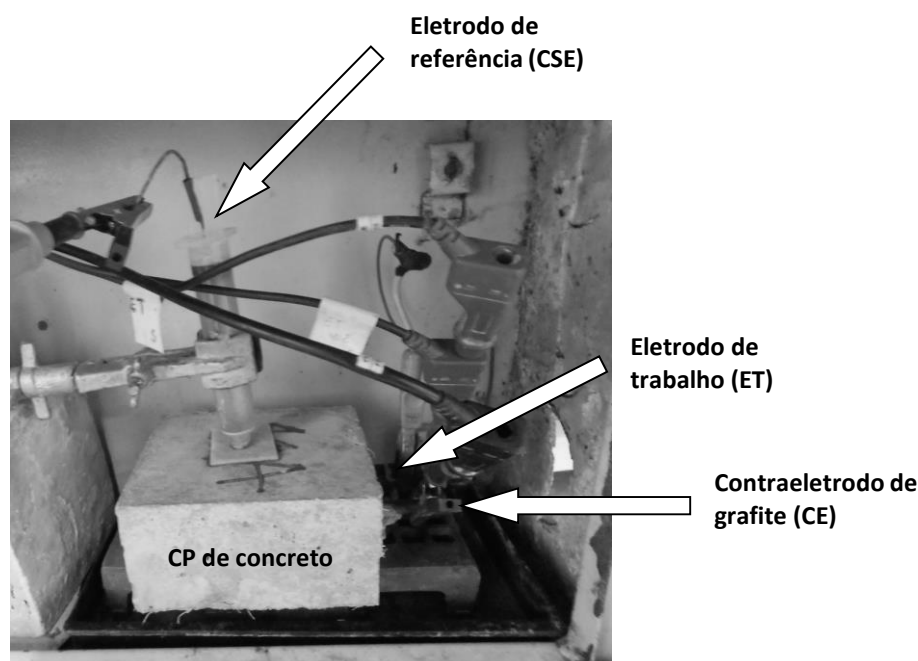


FIGURA 10 – FOTO ILUSTRATIVA DO PROCESSO DE MEDIDA ELETROQUÍMICA NO AUTOLAB, COM O CP DE CONCRETO, A BARRA METÁLICA (ET), O CONTRA ELETRODO DE GRAFITE (CE) E O ELETRODO DE REFERÊNCIA (CSE)

Espessura da armadura antes e após o envelhecimento. A taxa de corrosão da armadura do concreto foi obtida pela perda de espessura das barras metálicas para cada tipo de concreto e envelhecimento. Após a delimitação da área do aço exposta e antes da moldagem, foram realizadas 3 medições de espessura entre as nervuras do aço com um paquímetro digital de precisão de 0,01 mm, onde se obteve uma média das espessuras iniciais.

Após o término do envelhecimento dos CPs, os mesmos foram levados à fratura, aonde a barra metálica utilizada como eletrodo de trabalho passou por uma limpeza química com a solução de Clarke (método A) segundo a NBR 6210 (ABNT, 2008). Em seguida, foram registradas as espessuras das barras em 3 pontos entre as nervuras do aço desta região central com paquímetro digital de precisão de 0,01 mm, obtendo-se assim, a média das espessuras finais.

Caracterização das fibras internas do concreto. O uso da termogravimetria na caracterização das fibras natural e dosadas em concreto objetivou determinar a massa residual de carbono, e assim, inferir sobre a durabilidade das fibras dentro do concreto. Foi realizado em atmosfera oxidante de

O₂ da temperatura ambiente até 550 °C e, em seguida, desta até 850 °C em atmosfera inerte de N₂, com taxa de aquecimento de 20 °C/min.

As técnicas de SEM e EDS também foram utilizadas para verificar a integridade das fibras antes e após envelhecimento em dessecador, verificando a microestrutura das mesmas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, modelo XL30, um detector de Si(Li) da marca Thermo e o programa Noran System Six.

Microestrutura. Após envelhecimento nas câmaras, os CPs de concreto foram fraturados para possibilitar análise quanto à microestrutura e sua composição química elementar pelas técnicas de SEM e EDS. As superfícies de concreto analisadas foram retiradas de regiões internas ao concreto e próximas às barras de aço; e foram metalizadas com ouro. Os equipamentos utilizados foram o microscópio eletrônico de varredura da marca Philips, modelo XL30, um detector de Si(Li) da marca Thermo e o programa Noran System Six. As barras metálicas inseridas no concreto como armadura, após envelhecimento em câmaras e corte dos CPs, foram analisadas com um microscópio estereoscópico, modelo Zoom LABSZ-2250 trinocular da marca Laborana e registradas pelo programa de aquisição de imagens ISCapture versão 2.5.1.

3.2.3 Teste fotocatalítico

A infraestrutura laboratorial desenvolvida para a avaliação da eficiência fotocatalítica quanto aos poluentes gasosos consistiu de célula em PVC com 1,40 m de comprimento e 0,10 m de diâmetro, com uma lâmpada UV-A acoplada internamente ao sistema. A radiação UV de 0,68 W/m² e o comprimento de onda entre 320 e 400 nm incidiu diretamente sobre a amostra, e é o catalisador do processo. O sistema compreendeu, além da célula e do gás, um gerador de ar zero que retira as impurezas do ar (da Environnement modelo ZAG 7001), um calibrador multigás computadorizado (da Environnement modelo MGC 101) que ajusta a concentração do gás e um monitor de ambiente (marca Horiba) que faz a leitura dos teores de entrada e de saída da câmara, conforme registro da FIGURA 11.

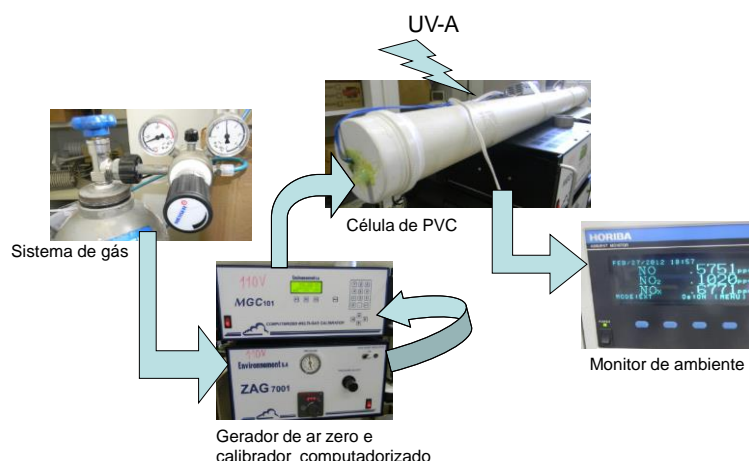


FIGURA 11 - FOTO ILUSTRATIVA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA FOTOCATALÍTICA PARA CPS DE CONCRETO

Os testes foram realizados com o gás poluente SO_2 na concentração de 0,7 ppm, e com o gás NO_x na concentração de 1,2 ppm; valor este utilizado por outros autores em trabalhos similares de oxidação de NO_x (MAGGOS *et al.*, 2007; BALLARI *et al.*, 2010). A concentração do SO_x foi determinada a partir das concentrações máximas permitidas pela Portaria Normativa IBAMA 348/1990, e pelos experimentos que possibilitassem a sua leitura e a confiabilidade dos resultados, uma vez que não foi encontrado trabalho similar com este poluente. Além disso, as concentrações obtidas dos gases NO_x e SO_2 em diversos ambientes e as contidas como limites máximos nas leis brasileiras estão bem abaixo desses valores. A taxa de fluxo foi de 0,7 L/min e o tempo de teste de 50 min após colocação do CP na célula de PVC. Os 10 min iniciais foram considerados para a estabilização do sistema com o valor da concentração de cada tipo de gás inicial; após, a radiação UV-A foi ligada e permaneceu por 35 min, onde verificou-se a atividade fotocatalítica; e por fim, nos últimos 5 min, a radiação foi desligada.

Foram moldados, para o estudo de fotocatalise, CPs de argamassa no formato retangular de (14,5 x 4,0 x 1,8) cm com camada superficial fotocatalítica de 0,2 cm. O traço utilizado para a base foi semelhante ao concreto REF e estabelecido em 1:3:0,4, ou seja, cimento: areia retida na # (peneira) 2,4 mm: a/c. Já, para a superfície, foram estudadas diversas concentrações de TiO_2 , em substituição ao cimento, variando de 5 a 90%. Nestes casos, o traço adotado foi de 1:3 (cimento: areia passante na # 2,4 mm), e o a/c variou de 0,8 a 2,0 (gradativo à maior

quantidade de nanomaterial), devido à elevada superfície específica do TiO_2 . Estes valores estão apresentados na TABELA 2. Esta camada superficial com TiO_2 foi adicionada à argamassa base apenas alguns minutos após a sua execução. O peneiramento do agregado miúdo foi realizado de forma a obter uma superfície mais uniforme.

TABELA 2 – DOSAGENS DA ARGAMASSA FOTOCATALÍTICA, CONTENDO O TEOR DE TiO_2 (EM SUBSTITUIÇÃO AO CIMENTO) E O RESPECTIVO A/C

Teor de TiO_2	5%	10%	20%	50%	70%	90%
Fator a/c	0,8	1,0	1,1	1,4	1,8	2,0

Preparados, os CPs permaneceram em cura ambiente com cobertura de filme plástico por, aproximadamente, 48 h e, em seguida, em cura úmida por pelo menos uma semana antes da realização dos ensaios de determinação do potencial fotocatalítico. Na FIGURA 12 estão mostradas imagens dos CPs de argamassa moldados sem TiO_2 e dos CPs com 70% de TiO_2 em processo de cura inicial, diferenciados pela coloração mais clara quando contêm maior concentração de TiO_2 .

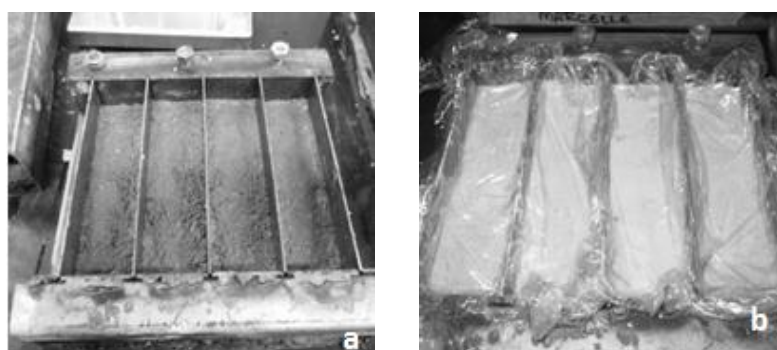


FIGURA 12 - CPs DE ARGAMASSA PARA TESTES FOTOCATALÍTICOS EM PROCESSO DE CURA INICIAL: a) SEM TiO_2 ; b) COM 70% TiO_2 (E COBERTURA DE FILME PLÁSTICO)

3.2.4 Fabricação de protótipos de artefatos

A verificação da tecnologia desenvolvida em laboratório foi realizada em campo com a fabricação de postes duplo T 200 daN, cruzetas retangulares e T, na empresa Barbosa & Barbosa Cia. Ltda. na Bahia. As dosagens otimizadas aplicadas aos artefatos de concreto foram: 0,8% FC, 0,8% FS, 8,5% CC e REF, este último recebeu a pintura de argamassa fotocatalítica com 30% de TiO_2 .

Para os postes foram realizados testes mecânicos de limite de carga até a ruptura aos 28 dias de cura, de acordo com a NBR 8451-1 (ABNT, 2011). Estes, também, foram inspecionados quanto às características normativas de alinhamento, planicidade, defeitos superficiais como fissuras, trincas, vazios, ninhos de concretagem, retrações e destaques superficiais de acordo com a NBR 8451-1 (ABNT, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MATÉRIAS PRIMAS

4.1.1 Caracterização dos Insumos

Cimento. As caracterizações física, química e mecânica do cimento CP II – Z 32 foram verificadas a fim de assegurar a conformidade do material, não ocasionando interferências nas propriedades do concreto. Esses resultados estão apresentados na TABELA 3 e na TABELA 4.

TABELA 3 – ENSAIOS FÍSICOS, QUÍMICOS E MECÂNICOS DO CIMENTO CP II – Z 32

Propriedades do cimento CPII-Z 32			
Resíduo na peneira	NBR 11579/12	# 200	2,6%
	NBR 12826/93	# 325	8,8%
Finura Blaine	NM 76/98		3790 cm ² /g
Expansão a frio	NBR 11582/12		0 mm
Consistência normal	NM 43/03		26,4%
Massa específica	NM 23/01		3,04 g/cm ³
Tempo de pega	NM 65/03	início	4:20 h
		fim	5:50 h
Resistência à compressão	NBR 7215/97	3 dias	23,0 MPa
		7 dias	26,4 MPa
		28 dias	32,8 MPa
Perda ao fogo	NM 18/12	NM 18/12	0,21%
Resíduo insolúvel	NM 15/12	NM 15/12	7,07%
Teor de CaO livre	NM 13/12	NM 13/12	6,96%

TABELA 4 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO CP II – Z 32 POR XRF

Componentes	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MnO	TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	Na ₂ O
Teor em massa (%)	54,80	21,53	4,73	5,43	2,94	2,66	0,03	0,24	0,97	0,10	0,19

A caracterização apresentada indicou que o cimento CP II – Z 32 está de acordo com o especificado pelas normas brasileiras ou informado pelo fabricante.

Agregado miúdo. A distribuição granulométrica do agregado miúdo ficou na zona ótima de aceitabilidade para a elaboração de argamassas ou concretos segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009) e sua curva resultante está apresentada na FIGURA 13. As propriedades do agregado miúdo obtidas nos ensaios físicos estão listadas na TABELA 5 e estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileiras. A sua composição química está apresentada na TABELA 6.

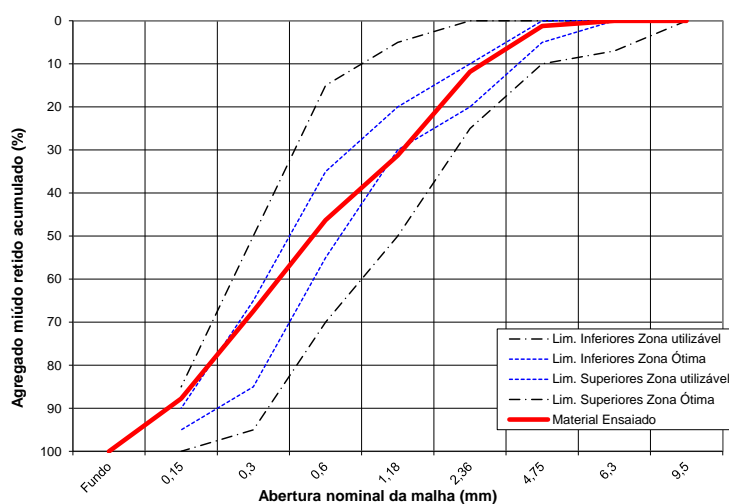


FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO

Propriedade	Norma	Valores
Módulo de finura	NBR NM 248/03	2,46
Dimensão máxima característica	NBR NM 248/03	4,75 mm
Massa específica	NBR NM 52/09	2,52 g/cm ³
Absorção	NBR NM 30/01	0,4%
Massa unitária	NBR NM 45/06	1,57 g/cm ³
Volume de vazios	NBR NM 45/06	0,4%
Teor de material pulverulento	NBR NM 46/03	5,6%
Teor de argila em torrões	NBR 7218/10	0,3%
Teor de impurezas orgânicas	NBR NM 49/01	300 ppm

A argamassa utilizada no estudo de fotocatalise foi produzida com agregado de granulometrias diferentes, uma para a base do CP (retida na # 2,4 mm), e outra para a camada superficial (passante na # de 2,4 mm), porém ambas caracterizam o agregado miúdo dos concretos desenvolvidos.

Na FIGURA 14 e FIGURA 15 estão apresentadas as curvas granulométricas correspondentes a estas frações de agregado miúdo. O agregado passante na # 2,4 mm foi caracterizado granulometricamente entre os limites de zona utilizável e de zona ótima, enquanto o agregado retido na # 2,4 mm estava fora destes limites. Como estes limites objetivam um maior empacotamento entre os constituintes do concreto e argamassa, propiciando o uso de uma menor quantidade de cimento, a utilização de agregados fora desta região indica uma maior abertura da massa cimentícia. E, neste caso, foi o proposto; uma maior abertura da argamassa para que o processo de fotocatalise ocorresse com mais facilidade.

TABELA 6 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AGREGADO MIÚDO POR XRF

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	MnO
Teor em massa dos materiais (%)	86,19	6,79	2,04	1,56	0,94	0,48	0,45	0,13	0,04	0,03

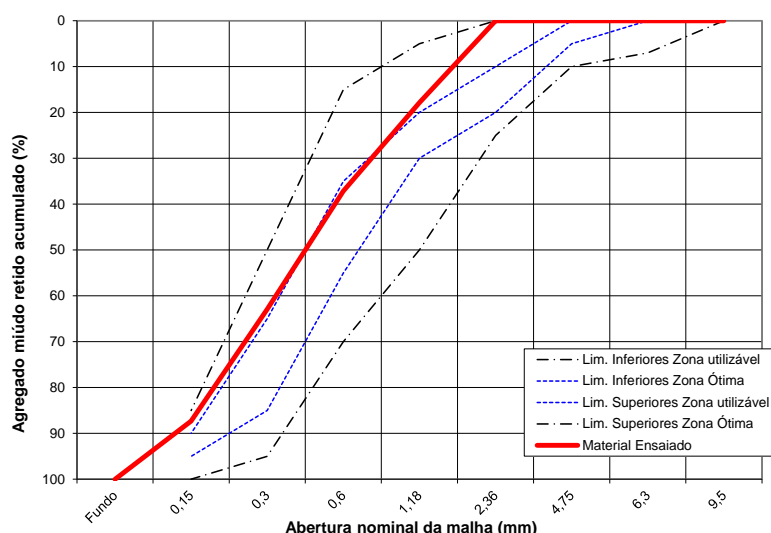


FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO PASSANTE NA # 2,4 MM

O módulo de finura e a dimensão máxima característica para os agregados passante na # 2,4 mm e retido na mesma #, foram respectivamente, 2,05 e 2,36 mm, e 4,95 e 6,3 mm.

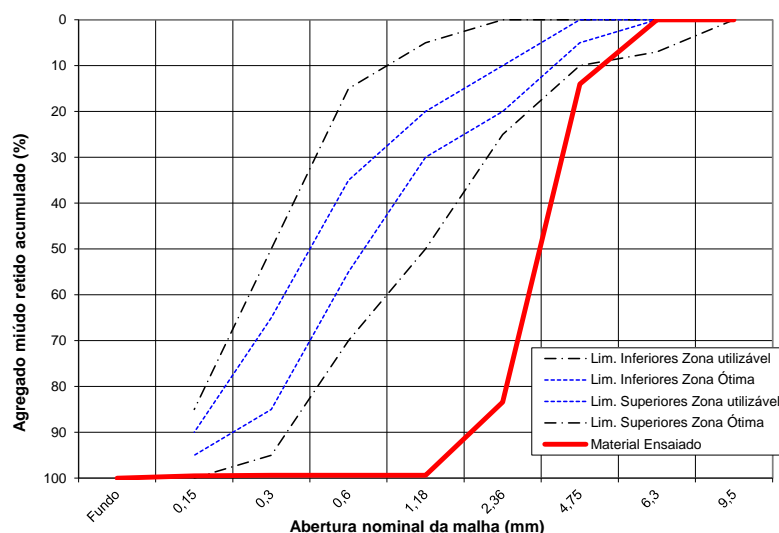


FIGURA 15 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO RETIDO NA # 2,4 MM

Como o agregado miúdo retido na peneira de 2,4 mm é de apenas 11%, conforme FIGURA 13, não justificou a realização dos demais ensaios de caracterização física, além do volume necessário para a execução destes.

As demais características do agregado miúdo passante na # de 2,4 mm constam na TABELA 7.

TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO MIÚDO PASSANTE NA PENEIRA DE 2,4 MM (UTILIZADO NOS CPS FOTOCATALÍTICOS)

Propriedade	Norma	Valores
Massa específica	NBR NM 52/09	2,99 g/cm ³
Teor de material pulverulento	NBR NM 46/03	5,6%
Teor de argila em torrões	NBR 7218/10	0,3%
Teor de impurezas orgânicas	NBR NM 49/01	300 ppm

Agregado graúdo. De forma similar, as características granulométricas e físicas do agregado graúdo encontram-se mostradas na FIGURA 16 e na TABELA 8.

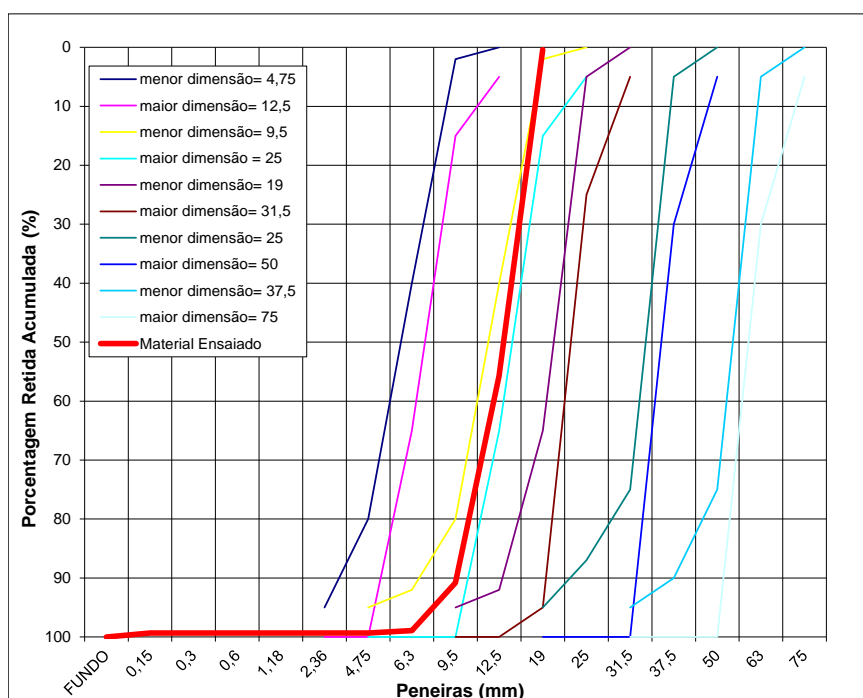


FIGURA 16 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO

TABELA 8 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO

Propriedade	Norma	Valores
Módulo de finura	NBR NM 248/03	6,87
Dimensão máxima característica	NBR NM 248/03	19 mm
Massa específica	NBR NM 53/09	2,60 g/cm ³
Absorção	NBR NM 53/09	0,4%
Massa unitária estado solto	NBR NM 45/06	1,46 g/cm ³
Massa unitária estado compactado	NBR NM 45/06	1,53 g/cm ³
Volume de vazios	NBR NM 45/06	44,2%
Teor de material pulverulento	NBR NM 46/03	0,7%

A análise petrográfica indicou as seguintes características: rocha de cor rósea com matriz de granulação fina (< 0,2 mm) constituída por quartzo (45%), feldspato alcalino (35%), plagioclásio (15%) e mica branca (5%).

O agregado graúdo empregado na confecção dos concretos estudados apresentou a seguinte classificação: agregado formado por fragmentos rochosos de composição metamórfica.

Fibras de Coco e Sisal. Os valores obtidos de massa específica foram de 1,270 e 1,370 g/cm³, respectivamente, para as FS e FC; enquanto a resistência à tração alcançou (875,00 ± 244,80) MPa para a FS e (156,50 ± 32,70) MPa para a FC. Estes valores estão próximos daqueles citados por Bledzki & Gassan (1999), Ratna Prasad & Mohana Rao (2011) e Silva *et al.* (2008a), tornando as FC e FS utilizáveis no desenvolvimento da pesquisa, especialmente pela capacidade de reforço que estas podem proporcionar ao concreto endurecido, além do controle de fissuração nas primeiras idades.

Na FIGURA 17, pela imagem da FS obtida por SEM, pode ser identificada uma variação do diâmetro das fibras ao longo do comprimento, da mesma forma que o comentado por Li (2000) e Mishra *et al.* (2004), entre outros. De forma geral, a microestrutura da FS utilizada nesta pesquisa demonstrou ter uma topologia celular homogênea.

Na FIGURA 18 está mostrada a morfologia superficial das FC com e sem tratamento alcalino em solução de 1% de NaOH. A FC sem tratamento contém uma quantidade de material não celulósico na superfície registrado na imagem da FIGURA 18(A), constatado por Li *et al.* (2009) em fibras de linho. O tratamento de limpeza nas fibras com solução de 1% de NaOH promoveu a remoção de cera, pectina, lignina e/ou hemicelulose na superfície das fibras, de acordo com o trabalho de Mulinari *et al.* (2011), assim como a camada superficial, propiciando uma maior área exposta de fibrilas e saliências globulares, constantes na imagem da FIGURA 18(B). Isto propiciou um aumento da rugosidade das FC, e portanto, uma maior adesão entre a fibra e a matriz cimentícia na produção do concreto. No entanto, de acordo com pesquisa desenvolvida por Gu (2009), a resistência à tração diminui com o tratamento alcalino.

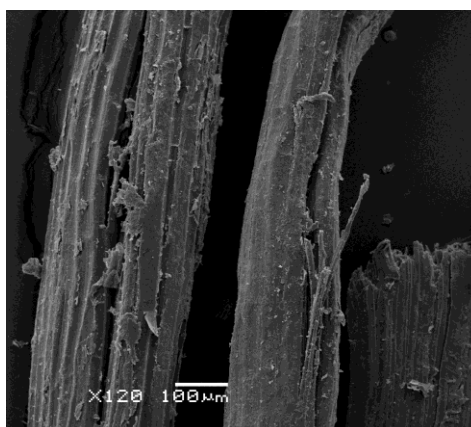


FIGURA 17 – IMAGEM DA FIBRA DE SISAL OBTIDA POR SEM COM AMPLIAÇÃO DE 120X

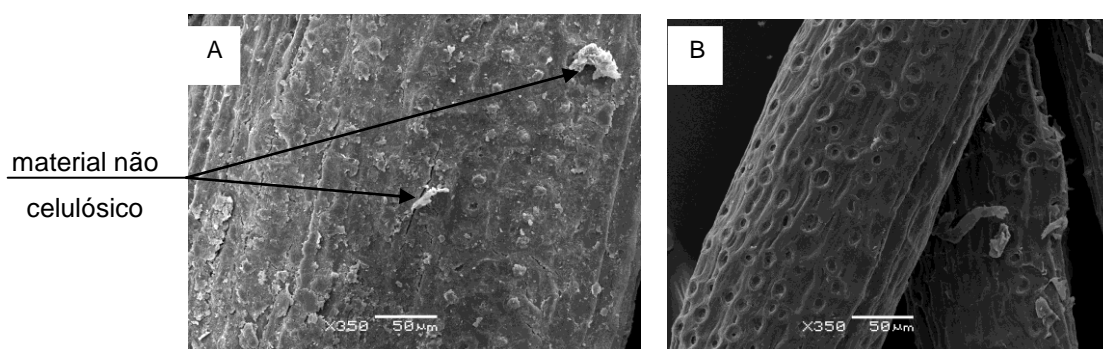


FIGURA 18 – IMAGENS DA FIBRA DE COCO EM SEM COM AMPLIAÇÃO DE 350X: (A) SEM TRATAMENTO ALCALINO; (B) COM TRATAMENTO ALCALINO EM SOLUÇÃO DE 1% DE NaOH

Cinza de Casca de Coco Verde. Os índices de atividade pozolânica obtidos de 2,2 MPa para a argamassa com cal e CC e 21,1% com o cimento mostraram que a CC não pode ser considerada como um material pozolânico, já que estes valores foram inferiores aos estabelecidos pelas normas (NBR 5751/1992 e NBR 5752/1992).

A composição química da CC está apresentada na TABELA 9, além dos elementos Br, SrO, ZrO₂, ZnO, MnO e CuO com concentrações menores que 0,1%. Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012), uma das exigências para um material ser considerado pozolânico é que a soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ deve ser de, no mínimo, 50%. Nesta pesquisa, o valor obtido foi de 5,4%, o que significa que a CC não é um material pozolânico, já que não atendeu, também, a este requisito.

Além disso, dos três outros requisitos da norma citada, estas atenderam a apenas um. A quantidade máxima de SO_3 , o qual pode provocar expansão nas primeiras horas de hidratação do cimento Portland pela formação de etringita, ficou abaixo dos 5%. Já, a quantidade detectada de Na_2O , que pode propiciar o surgimento de eflorescência ou a ocorrência de reação álcali-agregado, foi de 6,1%, sendo superior ao 1,5% da norma. Da mesma forma, a perda ao fogo foi de 28,38%, valor este bem além do estabelecido na NBR 12653/12 (6,0%), e que identifica a quantidade de material não totalmente calcinado existente na cinza.

TABELA 9 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CC POR XRF

Componentes	K_2O	Cl	Na_2O	SiO_2	CaO	P_2O_5	MgO	SO_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	Rb_2O
Teor em massa dos materiais (%)	29,3	16,0	6,1	5,2	4,4	4,3	3,8	2,0	0,1	0,1	0,1

Os resultados gráficos obtidos de XRD e TGA para a CC estão apresentados na FIGURA 19 e na FIGURA 20.

O material calcinado apresentou picos de difração do sal de cloreto de potássio e, em menor escala, picos de outras fases químicas minerais à base de óxidos, a sílica e o óxido de manganês, constantes na FIGURA 19. Estes picos não apresentam halo amorfo, e são característicos de amostra cristalina e, portanto, de baixa reatividade pozolânica.

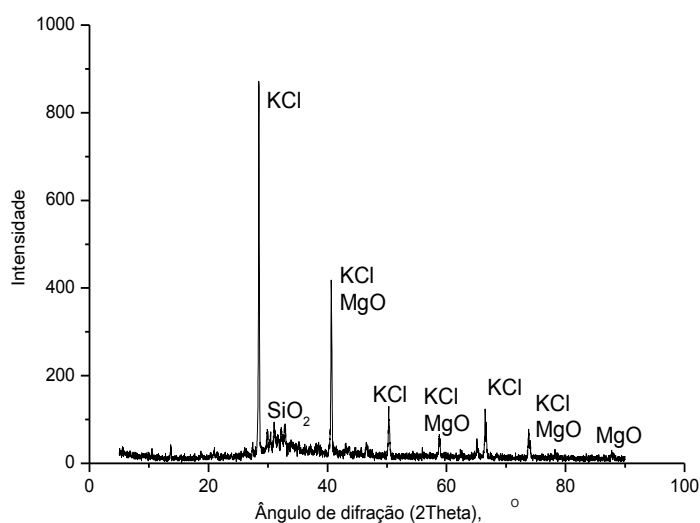


FIGURA 19 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA CC CALCINADA A 900 °C

A avaliação da CC pela técnica de TGA mostrou que ainda permaneceram cerca de 12% de compostos orgânicos no material processado a 550 °C e 1 h, de acordo com a FIGURA 20(A); e acima desta temperatura e tempo de tratamento térmico, o teor destes compostos baixou para menos de 3% conforme FIGURA 20(B), com o agravante de ter mantida ou mesmo aumentada a fase cristalina no material.

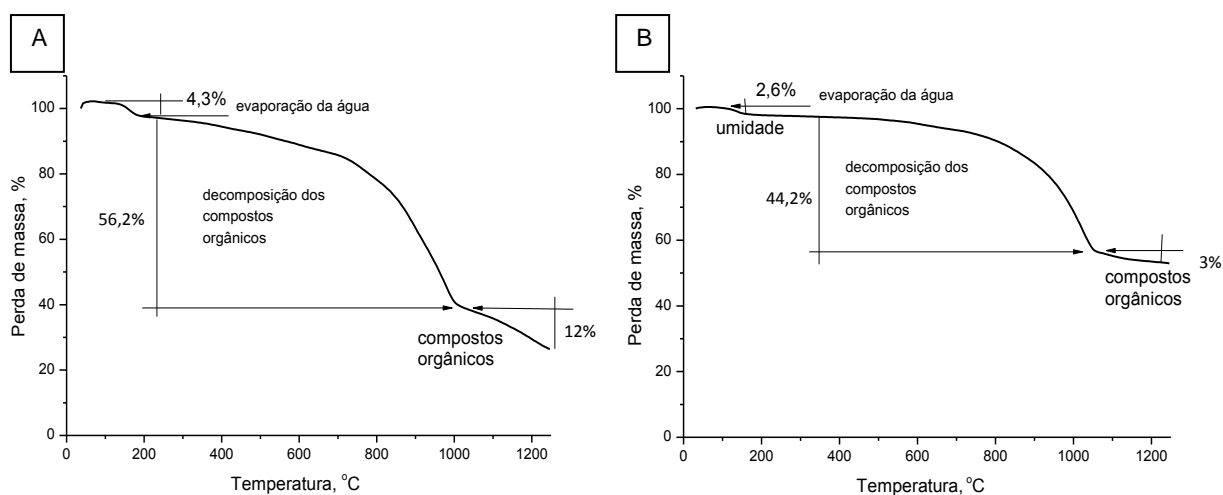


FIGURA 20 – ANÁLISES TERMOGRAVIMÉTRICAS DE CC CALCINADAS A: (A) 550 °C; (B) 900 °C

Na FIGURA 21, constam imagens de uma amostra de cinza obtida após a pré-calcinação do coco verde a 550 °C por 6 h e a cinza obtida após a calcinação a

900 °C por 1 h. A primeira, pré-calcinada (a), apresentou tonalidade acinzentada explicada pela concentração de carbono remanescente na amostra (os 12% identificados pela análise de TGA); já, a cinza final (b) obtida, foi de tonalidade verde-azulada.

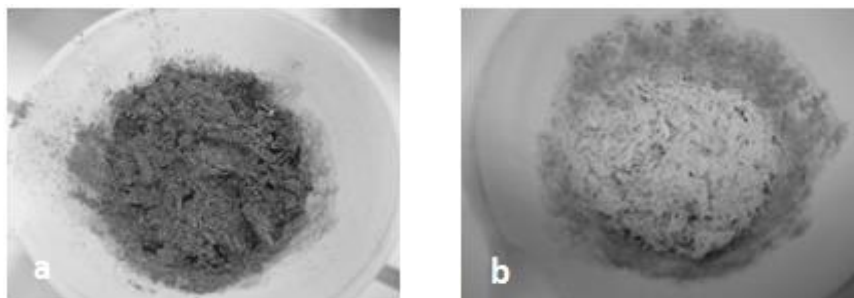


FIGURA 21 - CINZA DA CASCA DE COCO VERDE (a) APÓS QUEIMA DE 550 °C EM FORNO ELÉTRICO POR 6 H; (b) APÓS A CALCINAÇÃO DE 900 °C EM MUFLA POR 1 H

A massa específica obtida para a CC utilizada neste trabalho (pré-calcinada a 550 °C e calcinada a 900 °C/ 1 h) foi de 2,270 g/cm³; e a superfície específica atingiu 3.300 cm²/g pelo método Blaine e 3.510 cm²/g pelo BET. Este último valor possibilitou a utilização da CC, já que a NBR 11.578 (ABNT, 1997) especifica como valor mínimo de superfície específica 2.600 cm²/g para o CP II-Z 32, a fim de obter uma maior efetividade na mistura dos componentes.

Na FIGURA 22 é possível identificar a morfologia da CC obtida por SEM, na sua grande maioria em partículas angulosas, com tamanhos variando de 2 a 62 µm. Na análise por EDS, os elementos constituintes da CC foram predominantemente K (24,1%), N (21,7%), C (19,5%), e O (13,8%), além de Rb (9,4%), Cl (9,4%) e Na (2,1%).

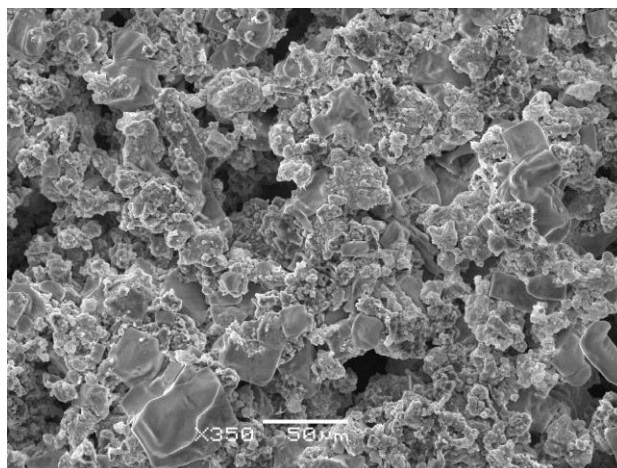


FIGURA 22 – IMAGEM DA CC OBTIDA POR SEM COM AUMENTO DE 350X

Dióxido de titânio. As análises feitas pela técnica de XRD indicaram que a fase predominante na amostra ensaiada foi a anatásio (87%), conforme difratograma apresentado na FIGURA 23.

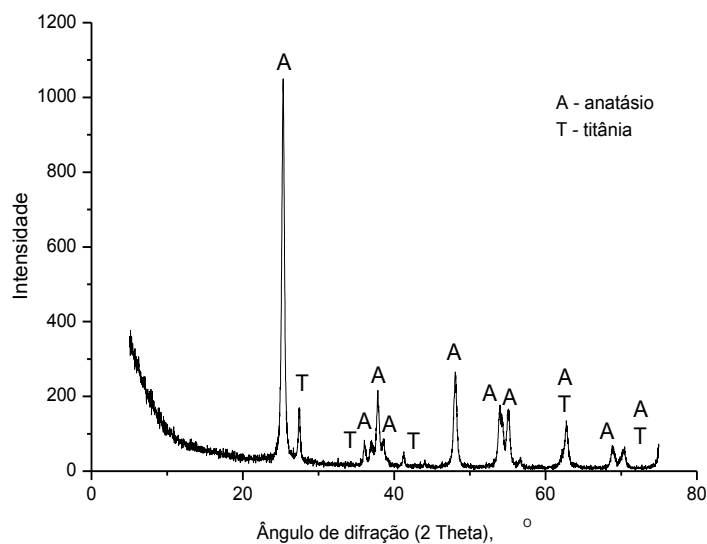


FIGURA 23 – DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA AMOSTRA TiO_2 , COM IDENTIFICAÇÃO DA FASE PREDOMINANTE ANATÁSIO

As análises por SEM não possuíam ampliação suficiente para visualizar as estruturas nanométricas presentes no TiO_2 fotocatalítico, conforme pode ser visualizado na FIGURA 24(A), com ampliação da ordem de 5000. Pelas barras

indicativas da dimensão linear nas próprias micrografias, pode-se inferir que o tamanho médio das partículas foram inferiores a 1 μm , ou seja, estão em escala nanométrica.

As análises por EDS indicaram que a amostra era composta predominantemente por titânio e oxigênio, conforme espectro ilustrado na FIGURA 24(B).

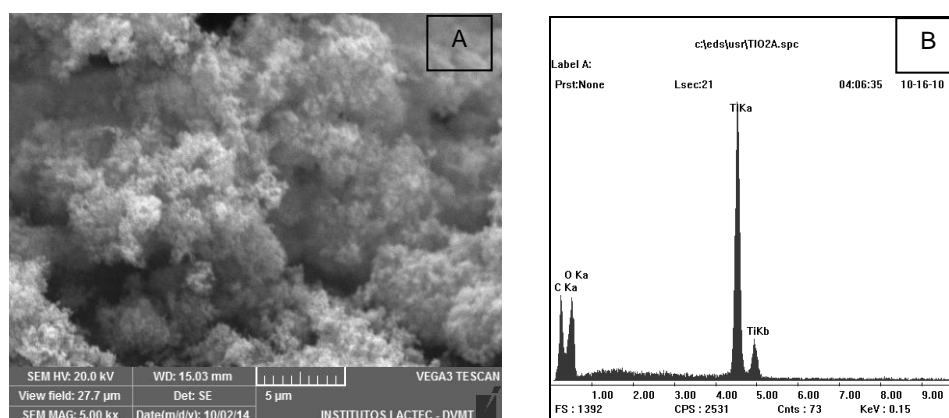


FIGURA 24 – ANÁLISE DA AMOSTRA NANO-TiO₂: (A) MICROGRAFIA POR SEM PARA VISUALIZAÇÃO DO TAMANHO DO CRISTALITO; (B) IMAGEM POR EDS PARA A IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS ELEMENTARES

O tamanho médio dos cristalitos obtido pela Equação de Scherrer e a partir do pico de difração de maior intensidade constante no difratograma de raios X, mostrado na FIGURA 25 foi de 44 nm.

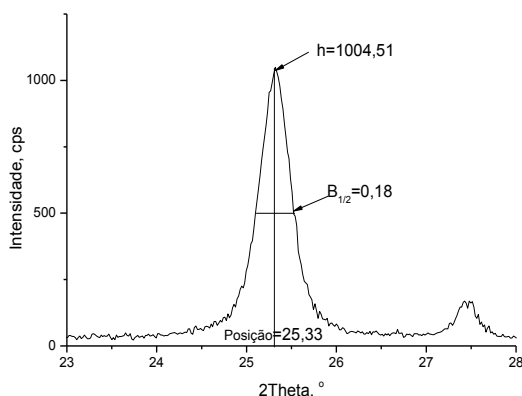


FIGURA 25 - PICO DE DIFRAÇÃO DE MAIOR INTENSIDADE DO DIFRATOGRAMA DE RAIOS X DA AMOSTRA TiO₂ PARA O CÁLCULO DO TAMANHO DO CRISTALITO, CONSIDERANDO $B_{1/2} = 0,18^\circ$ (0,007679 rad.) E $\theta = 12,66$

Potencial fotocatalítico do nano-TiO₂

Na determinação do potencial fotocatalítico do nano-TiO₂ para a oxidação do NO foi verificado que, após o contato com a substância fotocatalítica, o teor de NO gerado de 400 ppb reduziu para 70 ppb (mais de 82%, aproximadamente) e, como subproduto, observou-se a formação de NO₂ na ordem de 130 ppb. Com isto, pode-se concluir que o TiO₂ é um potencial oxidante de NO, mesmo sem a presença efetiva de luz UV, e por um curto período de tempo.

Na determinação do potencial fotocatalítico do TiO₂ para a oxidação do SO₂ foi verificado que, após o contato com o material o teor de SO₂ gerado de 416 ppb, reduziu para 209 ppb (aproximadamente 50%). Entretanto, a amostra utilizada como referência, a qual não continha a substância fotocatalítica, também apresentou redução semelhante. Assim, não foi possível avaliar o potencial de reação ou absorção deste gás pelo uso da substância fotocatalítica.

Neste caso, pode-se atribuir que o gás SO₂ foi absorvido, na sua maioria, pelo material utilizado na impregnação. Uma provável explicação é a interação do gás com a graxa de silicone, uma vez que esta apresenta grupos polares, tal como o gás, ou até mesmo com a umidade porventura presente no algodão utilizado, o que acarretou em grande área de contato e possibilidade de reação e consumo do SO₂, levando a produtos de oxidação, tais como SO₃²⁻ e SO₄²⁻.

4.2 DOSAGENS DE CONCRETO E ARGAMASSA

4.2.1 Caracterização do Concreto

4.2.1.1 Resistência mecânica

Os valores obtidos para os testes de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, resistência ao impacto, resistência à abrasão e o módulo de elasticidade para o REF estão especificados ao lado das demais dosagens, de forma comparativa com as

mesmas. Foi realizado tratamento estatístico dos resultados utilizando o teste de Tukey, a um grau de 95% de significância.

Concreto com FC. Os dados obtidos de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral para as dosagens com FC estão apresentados graficamente na FIGURA 26 e na FIGURA 27.

Todas as dosagens com FC atingiram o valor mínimo estabelecido aos 28 dias, de acordo com as normas brasileiras, ou seja, de 31,60 MPa, considerando as condições do processo.

O resultado obtido neste estudo não reproduziu o apresentado por Silva *et al.* (2008b), já que aqui não se verificou a degradação da fibra, especialmente pelo maior valor obtido para a resistência à compressão aos 91 dias com adição de 0,6% de FC, sendo 17% acima do valor médio apresentado pelo REF. No entanto, a percentagem de adição de FC estudada neste trabalho foi maior (0,6 a 1,0%) que a de Silva *et al.* (0,2%); possibilitando afirmar que existiu uma influência positiva na resistência à compressão do concreto quando da utilização de FC, a partir de um determinado percentual de adição.

A análise estatística utilizando o teste de Tukey com 95% de significância não indicou alguma diferença entre os concretos produzidos com FC e o REF.

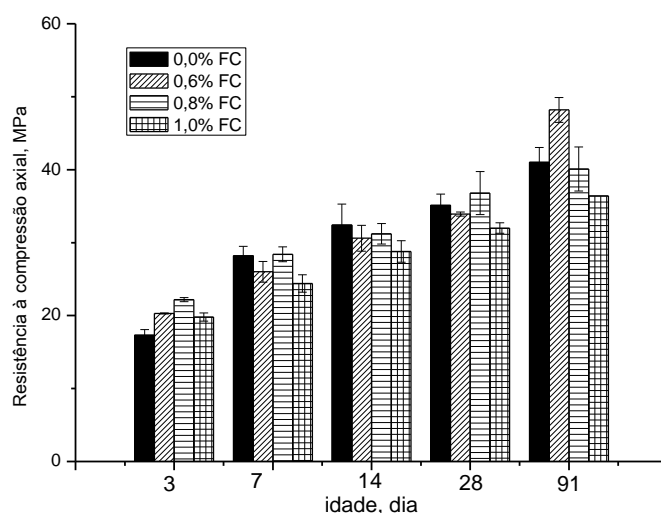


FIGURA 26 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FC (0,6; 0,8 e 1,0%)

A dificuldade de dispersão das fibras durante a mistura é um dos problemas e cuidados relatados na literatura, que pode ocasionar a formação de “novelos” e a perda de fluidez (FIGUEIREDO, 2011). Nas dosagens realizadas com FC nesta pesquisa, constatou-se uma homogeneidade na mistura e uma boa distribuição e coesão das fibras no concreto endurecido. Isto foi obtido pela colocação das fibras de forma lenta e gradual, o que proporcionou os resultados mecânicos comparáveis ou até superiores ao REF.

Com os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral das dosagens com adição de FC não foi possível afirmar alguma tendência; apenas que os valores estiveram dentro da margem de erro estabelecida para o REF. Este fator infere à utilização da FC na mistura, já que mesmo mantendo um comportamento de mesma ordem de grandeza, ocorre a redução do consumo de cimento / m³ de concreto, possibilitando a redução da geração de gases poluentes.

O módulo de elasticidade estático para o concreto com adição de 0,8% de FC atingiu $(30,23 \pm 1,10)$ GPa, e o valor para o concreto referência foi de $(31,25 \pm 0,49)$ GPa; valores que podem ser considerados de mesma ordem de grandeza devido ao desvio apresentado.

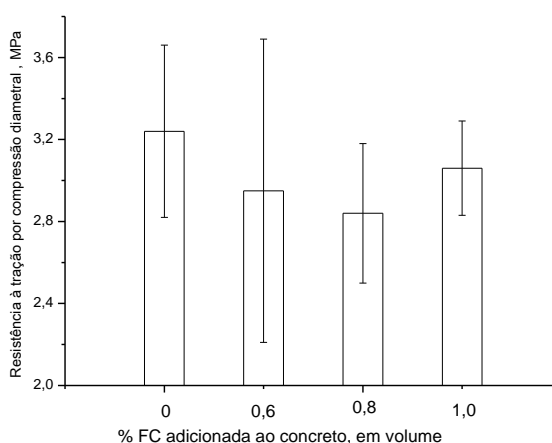


FIGURA 27 - GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FC (0,6; 0,8 e 1,0%) AOS 28 DIAS DE CURA

A análise estatística pelo teste de Tukey com 0,95 de significância não indicou alguma diferença entre os concretos produzidos com FC e o REF quanto às propriedades de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral.

As resistências à compressão e à tração estão fortemente relacionadas, no entanto, não há proporcionalidade direta. Quando é verificado um aumento da resistência à compressão do concreto, também se tem um aumento da resistência à tração, porém a uma taxa menos ascendente. Segundo Metha & Monteiro (2008), a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dos concretos é uma das importantes características. Para os concretos de baixa resistência, esta relação é da ordem de 10 a 11%, enquanto para os concretos de média e alta resistência a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é da ordem de 7 a 9%, respectivamente.

Na FIGURA 28 constam os dados da relação entre as resistências mecânicas à compressão axial e à tração por compressão diametral aos 28 dias de cura. Os valores obtidos para as dosagens com 0,6 e 0,8% de FC indicaram uma maior capacidade dos concretos resistirem às cargas por mais tempo, quando comparados ao concreto sem adições. Isto sugere uma ruptura mais dúctil, não tão frágil como a do concreto convencional.

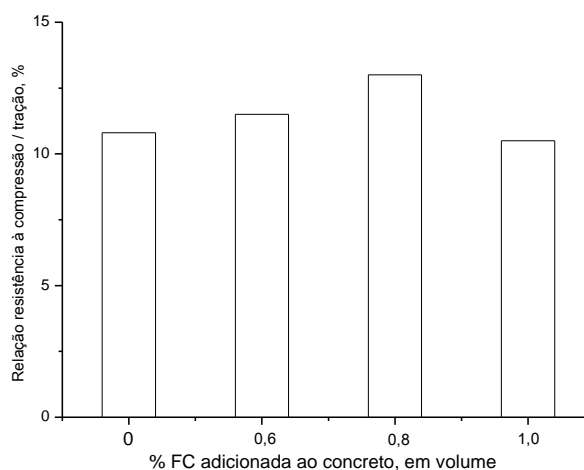


FIGURA 28 - GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FC (0,6; 0,8 E 1,0%), COMPARATIVAMENTE AO CONCRETO REF

O módulo de elasticidade estático para o concreto com adição de 0,8% de FC atingiu $(30,23 \pm 1,10)$ GPa, e o valor para o concreto referência foi de $(31,25 \pm 0,49)$ GPa; valores que podem ser considerados de mesma ordem de grandeza devido ao desvio apresentado. Estes dados foram analisados estatisticamente pelo

teste de Tukey, o qual confirmou, com significância de 95% que, os concretos REF e com adição de FC não apresentaram diferença significativa quanto ao módulo de elasticidade estático.

Com relação ao ensaio de resistência à tração na flexão, a dosagem com adição de 0,8% de FC obteve valores superiores (8,5%) ao concreto REF ($4,32 \pm 0,10$) MPa e ($3,98 \pm 0,06$) MPa, respectivamente. Isto corrobora com os trabalhos encontrados na literatura que, a adição de fibras melhora a propriedade de resistência à tração na flexão, segundo Sarmiento & Freire (1997). No entanto, a análise estatística pelo teste de Tukey indicou similaridade no desempenho dos mesmos quanto à resistência à tração na flexão.

As características da FC no concreto, é que determinaram a capacidade de reforço que o material pode proporcionar ao compósito, especialmente o módulo de elasticidade e a resistência mecânica das fibras (FIGUEIREDO, 2011). O módulo de elasticidade dos concretos produzidos com FC foi similar ao REF. Além deste fato, segundo Figueiredo (2011), a grande contribuição da adição de FC está centrada no aumento da energia associada à ruptura do concreto e à restrição à propagação de fissuras.

Neste sentido, na FIGURA 29, constam os resultados de resistência ao impacto dos concretos REF e com 0,8% de FC. Foi constatado que para o concreto REF foi necessário um número menor de impactos (altura de queda) para o surgimento da primeira fissura ($0,97 \pm 0,10$) m, quando comparado ao concreto com adição de FC ($1,47 \pm 0,14$) m. Este valor determinou uma menor energia e, portanto, uma menor resistência ao impacto para o concreto REF, de até 40%, comparativamente ao concreto com 0,8% FC, mesmo no estágio final de ruptura. O teste de Tukey corroborou que, o concreto com FC apresentou desempenho superior ao REF no que tange a resistência ao impacto, considerando o grau de significância de 95%, ou seja, estatisticamente os valores são significativos.

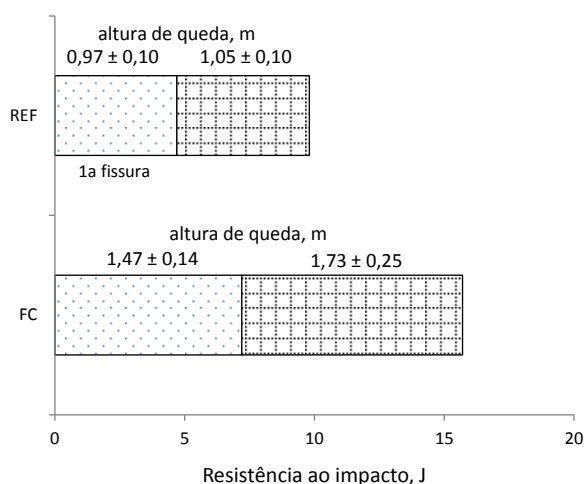


FIGURA 29 - GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FC AOS 28 DIAS DE CURA, QUANDO DO SURGIMENTO DA PRIMEIRA FISSURA E DA RUPTURA DO CP

As fotos ilustrativas da FIGURA 30, retratam o aspecto físico dos CPs ao longo do ensaio de impacto. Para o concreto REF, a primeira queda da esfera propiciou um amassamento no CP (A); após, ocorreu um deslocamento do concreto (B); na sequência, o surgimento das fissuras (C) e, por último, a ruptura do CP (D). Para o concreto com adições de fibras, o comportamento foi semelhante, diferindo apenas nas alturas de queda (ou na energia dissipada), além dos amassamentos e deslocamentos que ocorreram mais lentamente, indicando assim, ser este concreto um material mais dúctil que o REF. Este foi explicado pela capacidade das fibras de transferência de tensão pelas fissuras, aumentando a energia associada à ruptura do concreto e à restrição à propagação de fissuras.

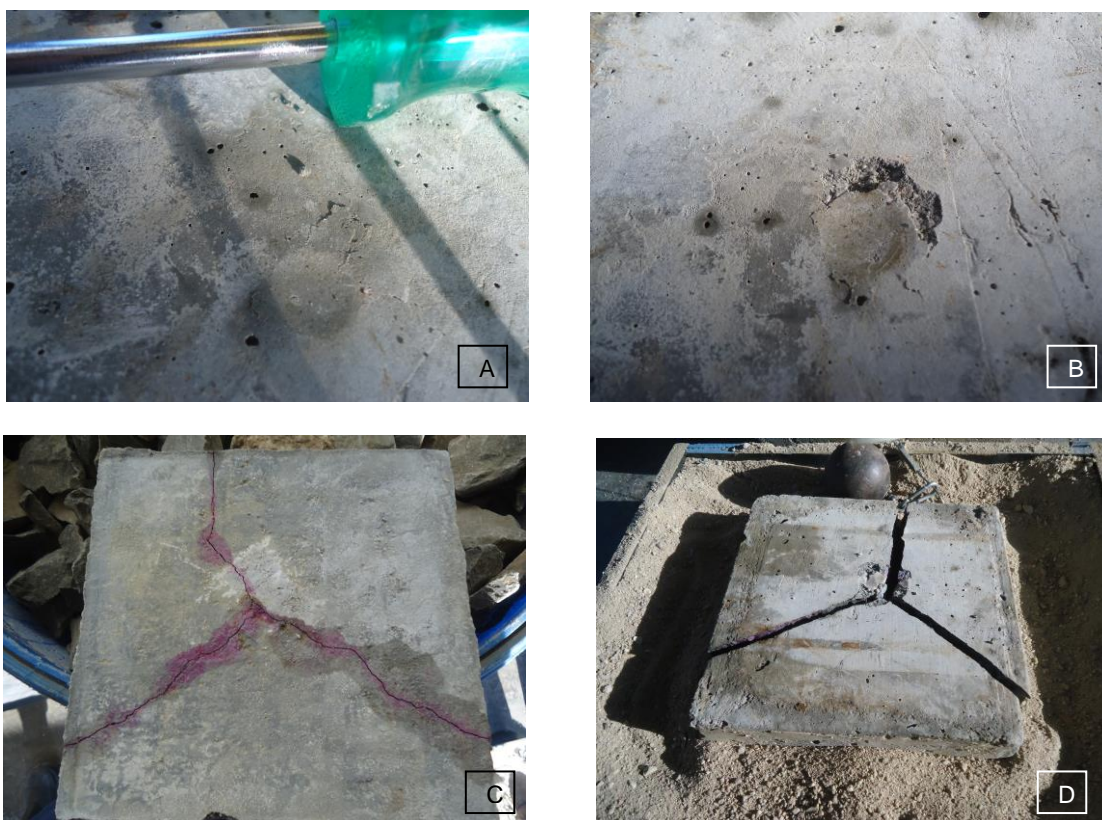


FIGURA 30 – IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA DE CONCRETO REF DURANTE O ENSAIO DE IMPACTO: (A) AMASSAMENTO; (B) DESPLACAMENTO; (C) FISSURAS; E (D) RUPTURA

As fissuras observadas durante o ensaio de impacto atingiram valores de 0,05 a 0,90 mm para o concreto REF, e entre 0,05 e 1,90 mm para o concreto com FC. No entanto, para o concreto REF foi observado seccionamento total do CP, enquanto para os com FC, mesmo ocorrendo a ruptura, as fibras mantiveram os CPs unidos, conforme está ilustrado na FIGURA 31.

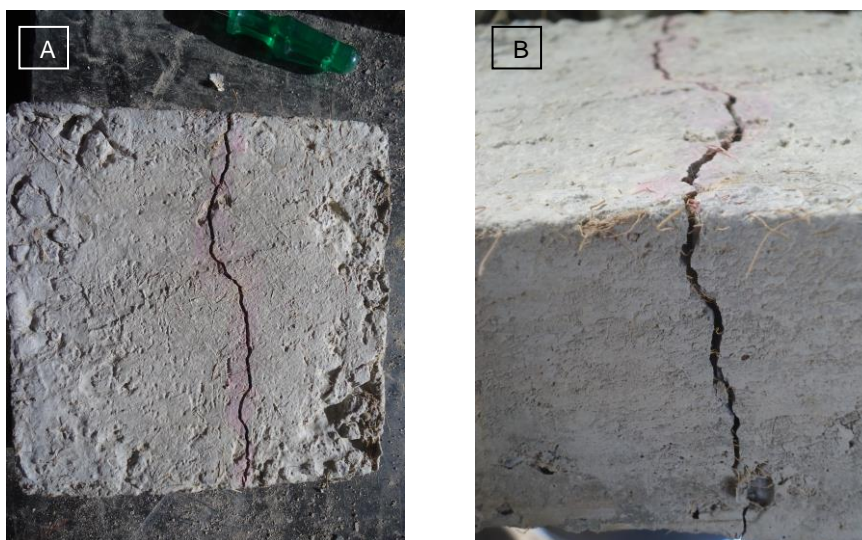


FIGURA 31 – IMAGEM DE CP DE CONCRETO COM 0,8% FC APÓS ENSAIO DE IMPACTO, APRESENTANDO FISSURA DE 1,0 MM: (A) VISTA SUPERIOR; (B) DETALHE LATERAL DA FISSURA

A região da fissura que foi registrada em microscópio estereoscópico apresentou FC distribuídas aleatoriamente, em diferentes sentidos (longitudinal, transversal), e algumas destas estavam aparentemente intactas, enquanto outras já rompidas, conforme FIGURA 32. Considerando um diagrama de tensão por deformação elástica para o concreto reforçado com FC, este se deforma, quando tracionado, com diferentes graus de tensão, um para cada fase (matriz cimentícia e fibras). Quando a matriz cimentícia se rompe, surgindo fissuras, transfere a carga para as fibras, que estão em uma tensão mais baixa (que a matriz) nesse grau de deformação, até que o conjunto de fibras apresente uma capacidade de reforço. Como os diâmetros e os comprimentos das fibras não foram iguais, algumas resistiram mais que outras.

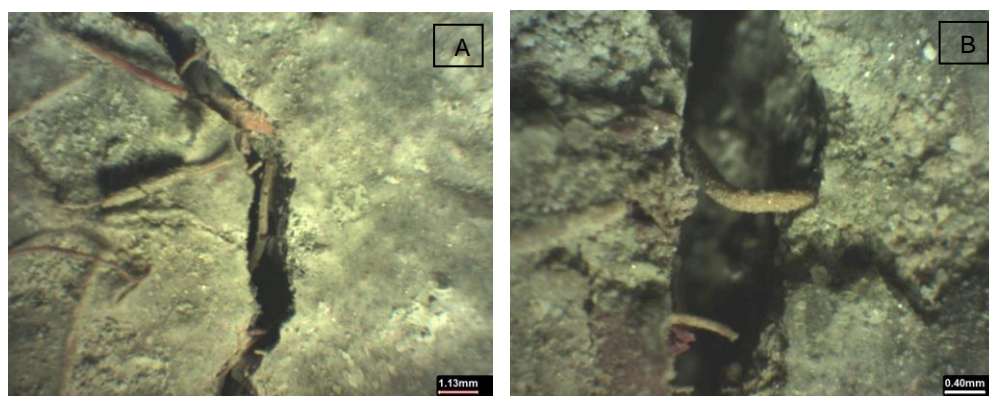


FIGURA 32 - MICROGRAFIAS DE CP DE CONCRETO COM 0,8% FC, APRESENTANDO FISSURAS APÓS ENSAIO DE IMPACTO: (A) FC DISTRIBUÍDAS ALEATORIAMENTE COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DAS FIBRAS: UMA INTACTA E OUTRA COM RUPTURA COM AUMENTO DE 40X

O comprimento da fibra é de fundamental importância, permitindo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorreu no concreto. As dimensões de uma fibra, geralmente, caracterizam a maior ou menor capacidade de reforço no concreto pela propriedade de resistência à tração da mesma (PEREIRA *et al.*, 2013; ALI *et al.*, 2012). Ou seja, fibras de mesma espécie, como FC, que têm maiores comprimentos ou diâmetros, resultam em maiores valores de resistência à tração e, portanto, maior dificuldade de ruptura ao impacto de CPs quando adicionadas ao concreto.

Na FIGURA 33 constam as FC utilizadas neste trabalho, evidenciando variabilidade nos seus comprimentos e diâmetros. O primeiro é atribuído ao sistema de corte das fibras, enquanto o diâmetro é característico da produção destas fibras.

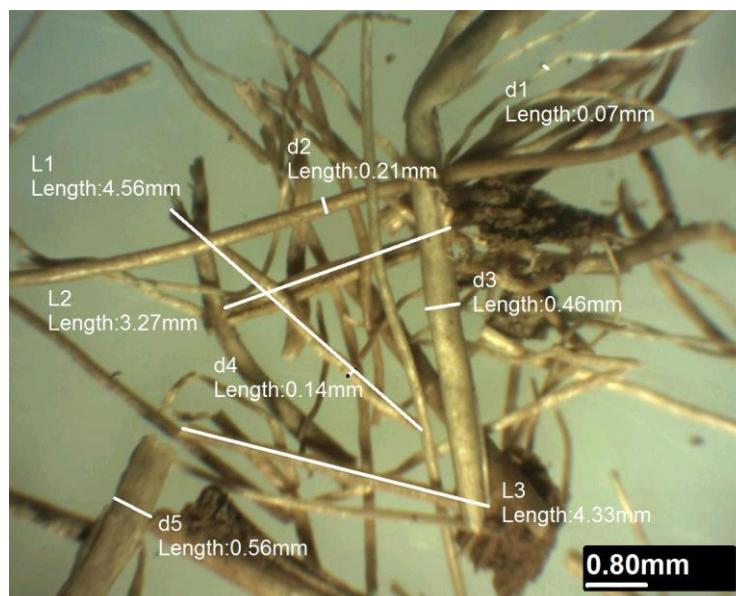


FIGURA 33 – IMAGEM DE FIBRAS DE COCO OBTIDA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO COM AUMENTO DE 20X, APRESENTANDO ESPESSURA E COMPRIMENTO VARIADOS. OBS. EM VIRTUDE DA UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE DO EQUIPAMENTO, AS MEDIDAS ESTÃO APRESENTADAS EM INGLÊS.

Na FIGURA 34, estão apresentados os valores de perda de massa por abrasão dos concretos com adição de FC e REF. Os dados obtidos indicaram similaridade no desempenho quanto à abrasão para os concretos REF e com 0,8% de FC, confirmado pelo teste de Tukey.

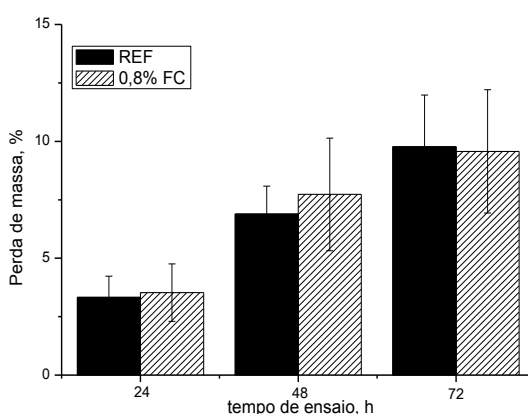


FIGURA 34 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FC AOS 28 DIAS DE CURA, APRESENTANDO A PERDA DE MASSA EM 24, 48 E 72 H

Imagens dos CPs de concreto com 0,8% FC foram feitas durante o ensaio de abrasão, e estão na FIGURA 35. É possível afirmar que, após iniciado o desgaste, o meio de abrasão tendeu a permanecer na mesma região da amostra afetada, ampliando este resultado.

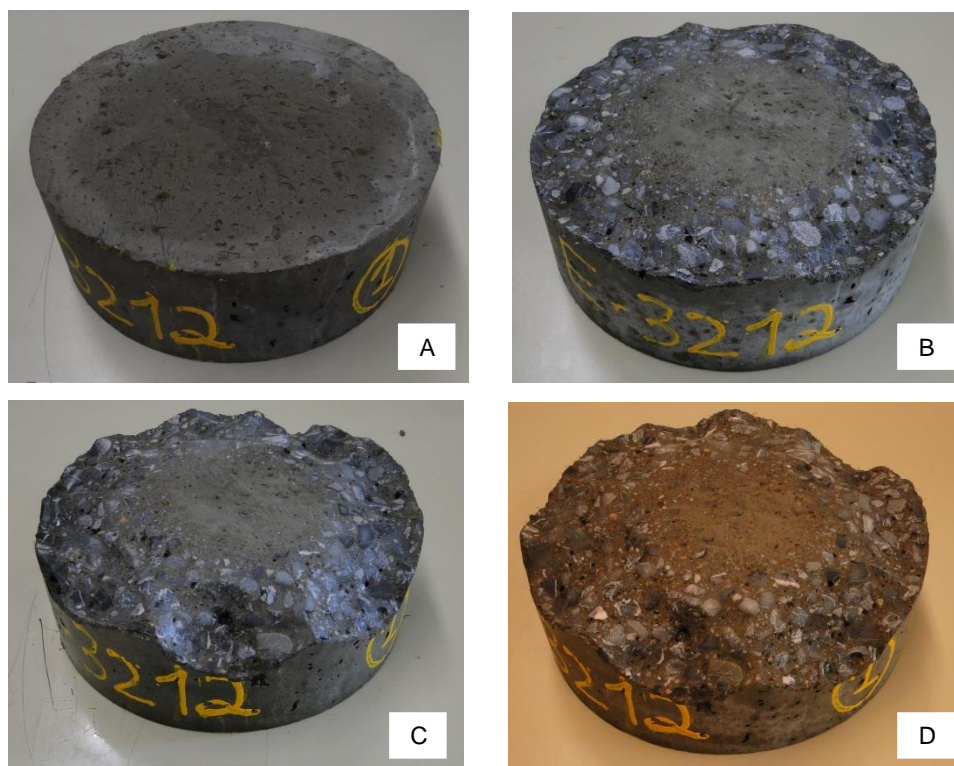


FIGURA 35 – ENSAIO DE ABRASÃO: IMAGENS DO CP DE CONCRETO COM 0,8% FC: (A) ANTES DO ENSAIO; (B) 24 H; (C) 48 H; (D) 72 H, APÓS ENSAIO

Em comparação ao concreto REF, o concreto com FC apresentou uma área superficial maior sem ter sido afetada, que pode ser observada nos gráficos da FIGURA 36.

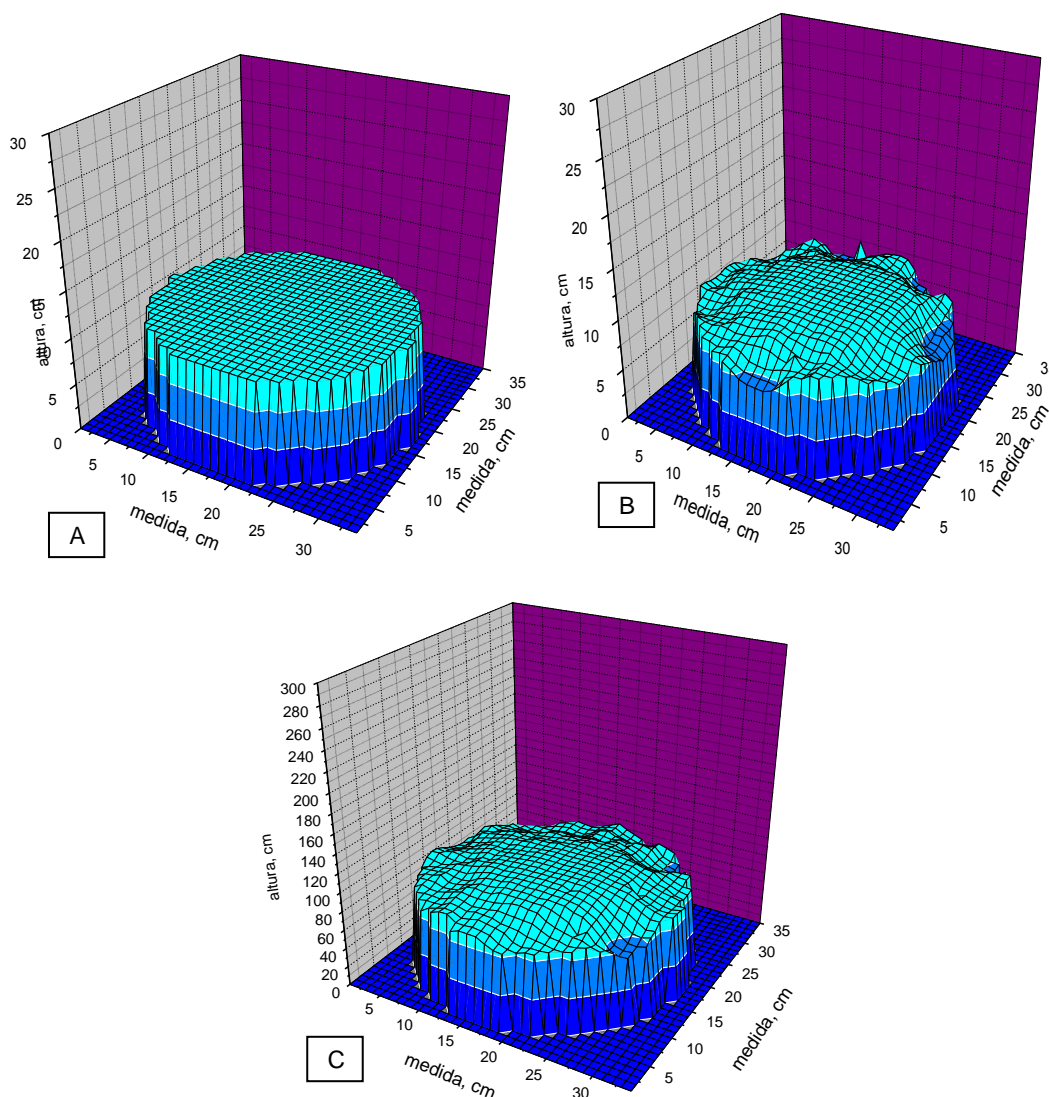


FIGURA 36 – GRÁFICO ESQUEMÁTICO 3D DO DESGASTE OCORRIDO NO ENSAIO DE ABRASÃO: (A) CP ANTES DO ENSAIO; (B) CP COM 0,8% FC APÓS 72 H; (C) CP REF APÓS 72 H

Os dados obtidos de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral para as dosagens de concreto com e sem tratamento das fibras, estão listadas na TABELA 10. Os resultados foram similares inferindo pelo não tratamento alcalino das fibras, confirmado pelo teste de Tukey com 95% de confiabilidade. A coesão das fibras com a massa cimentícia, verificada visualmente no rompimento dos CPs, contribuiu para esta decisão (uso de fibras não tratadas), mesmo com a morfologia da fibra tratada mais propícia.

Os valores obtidos de resistência à compressão axial para os concretos com 0,8% de FC aos 600 dias de cura indicaram uma melhora, quando comparados com

o REF. Os aumentos constatados foram de 3,8% para o concreto com fibras “in natura”, e 8,3% para o concreto produzido com fibras tratadas. Desta forma, é possível afirmar que, até os 600 dias, não foi constatado despolimerização da celulose da FC pela presença do cimento como elemento básico nos concretos.

TABELA 10 – DADOS RELATIVOS À RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA OS CONCRETOS REF E COM 0,8% DE FC TRATADA E SEM TRATAMENTO

Propriedade	Concreto	Concreto com FC	
	REF	sem tratamento alcalino	com tratamento alcalino
Resistência à compressão (MPa)			
7 dias	28,2 ± 1,28	28,4 ± 1,02	29,0 ± 1,27
28 dias	35,1 ± 1,57	36,8 ± 2,95	35,1 ± 1,48
91 dias	41,0 ± 2,06	40,1 ± 3,03	38,9 ± 1,48
600 dias	46,9 ± 0,64	48,7 ± 1,79	50,8 ± 1,34
Resistência à tração (MPa)	3,24 ± 0,42	2,84 ± 0,34	3,32 ± 0,11

Os traços utilizados na produção dos concretos com FC apresentaram bons desempenhos mecânicos ao longo de 600 dias. A dosagem de concreto com adição de 0,8% de FC superou os valores de resistência à compressão do concreto REF aos 28 dias em 4,8%. Portanto, a adição da FC não tornou o material menos resistente, e proporcionou sim, uma redução de 1,7% na quantidade de cimento/m³ de concreto, propiciando assim, uma redução do custo e uma menor geração de gases poluentes na atmosfera, como, também, a utilização de materiais inservíveis. Além disso, o comportamento ao impacto deste material apresentou superioridade em até 40% em relação ao REF.

Concreto com FS. Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias atingiram o valor mínimo estabelecido nas NBR 8451-1 (ABNT, 2011) e NBR 12655 (ABNT, 2006) para as dosagens REF e com adição de 0,6 e 0,8% de FS, conforme mostrado na FIGURA 37.

A adição de 1,0% de FS ao concreto atingiu 92,1% do valor estabelecido pelas normas para a resistência à compressão axial; e de apenas 82,9% em relação ao REF aos 28 dias. Portanto, estes valores indicaram a não aplicabilidade de 1,0% de adição de FS aos concretos convencionais.

As dosagens com adição de 0,6% e 0,8% de FS apresentaram desempenhos quanto à compressão axial superiores ao REF aos 91 dias, de 8,1 e 9,8%, respectivamente. No entanto, a análise estatística utilizando o teste de Tukey apontou que para um erro de 5%, os concretos REF, com 0,6% de FS e com 0,8% de FS tiveram resultados semelhantes.

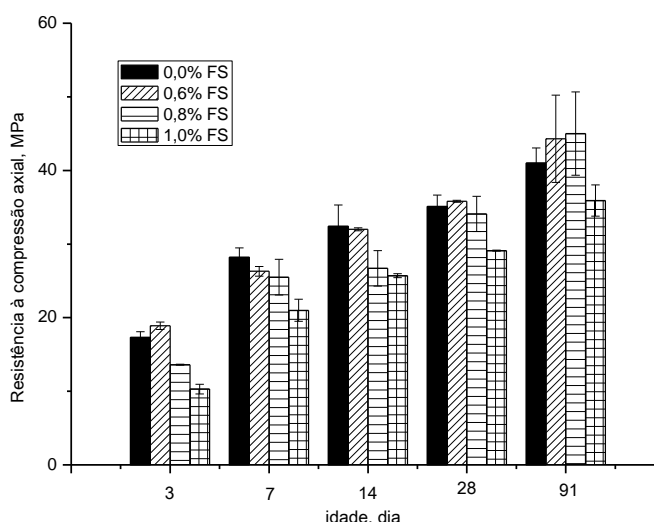


FIGURA 37 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FS (0,6; 0,8 e 1,0%)

De forma similar à adição de FC, a adição das FS tornou o material mais resistente, propiciando uma redução de 4,3% na quantidade de cimento/m³ de concreto, e como consequência, menor geração de gases poluentes (inferindo-se que cada 1 kg de cimento produzido gera 0,8 kg de CO₂ na atmosfera (WORRELL *et al.*, 2001; IEA, 2007), tem-se uma redução direta de cerca de 6 kg de CO₂/m³ de concreto produzido) e a preservação de recursos naturais para gerações futuras.

No estudo de Resende *et al.* (2004), o concreto de resistência normal reforçado com 1% de FS reduziu a resistência à compressão em 29,54%, quando comparado com o seu REF. Para o autor, isto ocorreu pelo maior tempo envolvido

na etapa de adensamento pela presença das fibras, facilitando a produção de concretos com mais vazios e deficiências na aderência fibra/matriz.

Nesta pesquisa, os valores obtidos para os concretos produzidos com adição de FS estiveram diretamente relacionados à qualidade da produção de concreto, especialmente na colocação dos componentes e homogeneização da mistura. Na FIGURA 38(A), estão apresentadas as superfícies de fratura dos CPs produzidos com 0,6 e 1,0% de FS, mostrando boa distribuição (dispersão) e coesão das fibras no concreto endurecido (sem vazios), enquanto a FIGURA 38(B) é uma micrografia por SEM do concreto com 0,6% de FS, complementando e confirmando a análise visual.

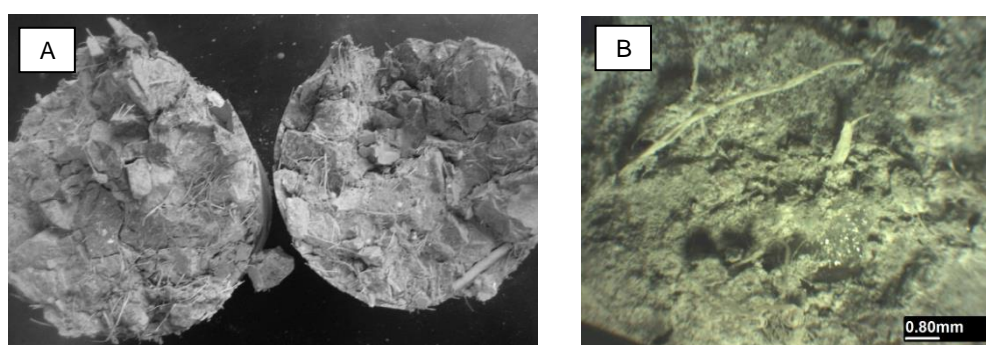


FIGURA 38 – CPs DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FS APÓS TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL: (A) ANÁLISE VISUAL INTERNA DA LIGAÇÃO FIBRA-CONCRETO; (B) IMAGEM OBTIDA POR MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO COM AUMENTO DE 20X

Em analogia ao concreto com FC, a distribuição das FS deve ser feita lentamente, de forma a homogeneizar entre os demais componentes, não formando “novelos” e mantendo a fluidez do concreto.

A trabalhabilidade atingiu 35 mm para todas as dosagens com FS, enquanto o valor para o concreto REF foi de 40 mm. Portanto, ocorreu redução da trabalhabilidade no concreto com FS, porém em um pequeno grau, dentro do desvio estabelecido para o teste do abatimento. Esses dados não conferem exatamente com os de Silva *et al.* (2008b), já que não houve a necessidade de utilizar aditivo plastificante. Nesta pesquisa citada, o traço do concreto utilizado foi de 1: 2,12: 4,00: 0,63, com abatimento de 70 mm.

O estudo de Sarmiento & Freire (1997) indicou a adição de fibras naturais ou artificiais para melhorar as propriedades mecânicas, como a resistência à tração, à flexão e ao impacto. Nesta pesquisa, quanto à propriedade de resistência à tração por compressão diametral, isto não ocorreu. Os valores foram considerados de mesma ordem de grandeza para os concretos sem adição e com as FS, aos 28 dias de idade; sendo isto confirmado pelo teste de Tukey com grau de confiabilidade de 95%. Os resultados estão apresentados na FIGURA 39. Conforme pode ser observado, a adição de FS nos concretos não propiciou uma melhora quanto a resistência à tração, esta se manteve constante independente do teor de adição de fibras.

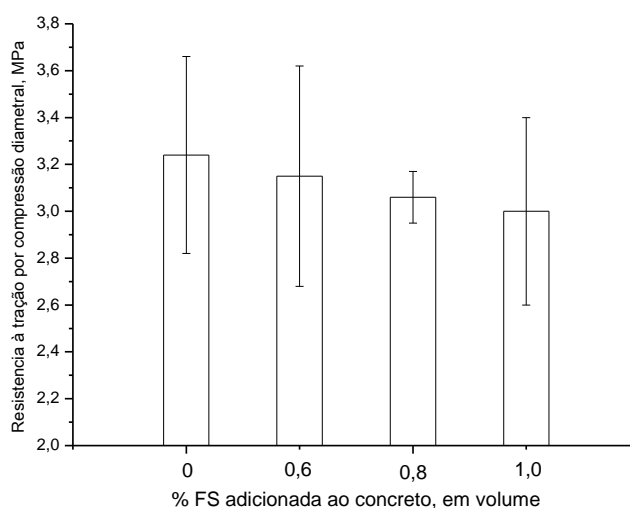


FIGURA 39 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE FS (0,6; 0,8 e 1,0%) AOS 28 DIAS DE CURA

A relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão dos concretos reforçados com FS aos 28 dias de cura estão apresentados na FIGURA 40. Os concretos reforçados com 0,6% e 0,8% de FS em volume apresentaram valores entre 8 e 9% para a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão, indicando média capacidade de resistência mecânica.

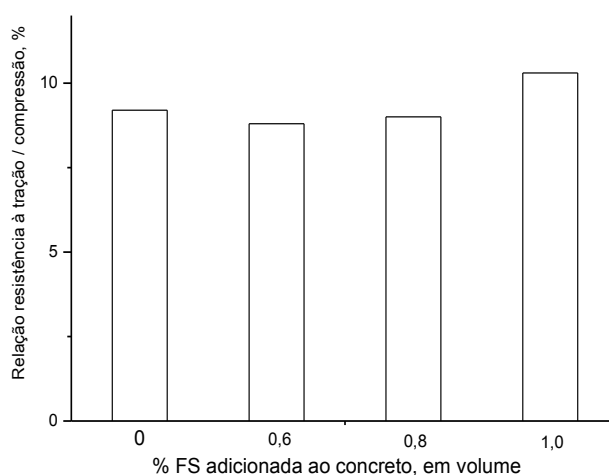


FIGURA 40 - GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FS (0,6; 0,8 E 1,0%), COMPARATIVAMENTE AO CONCRETO REF

Os valores de resistência à tração na flexão obtidos para a dosagem com adição de FS e para o REF foram $(4,18 \pm 0,34)$ MPa e $(3,98 \pm 0,06)$ MPa, respectivamente. Segundo a análise estatística feita com o teste de Tukey com 95% de significância para esta propriedade, os concretos REF e com adição de FS não foram estatisticamente significativos, ou seja, podem ser considerados de mesma ordem de grandeza. No entanto, estes indicaram uma melhora na resistência à tração na flexão de 5% para o concreto com 0,8% de FS, em comparação ao REF; corroborando com Sarmiento & Freire (1997) que, a adição de fibras melhora a resistência à flexão, entre outras.

Quanto à propriedade de resistência ao impacto, também foi verificada melhora no concreto produzido com FS, em comparação ao REF. Isto pode ser identificado nos resultados obtidos constantes na FIGURA 41. Assim, da mesma forma que as FC, a adição de 0,8% de FS no concreto propiciou uma barreira à propagação de tensões, aumentando a energia associada ao surgimento de fissuras e à ruptura do concreto.

Durante o ensaio de impacto, o aspecto físico dos CPs de concreto com FS foi o mesmo observado para os concretos REF e com FC. Conforme anteriormente citado, foi identificado amassamento, deslocamento, fissuras e ruptura do concreto.

Para o concreto com adição de FS foi obtida uma altura de queda de $(1,28 \pm 0,16)$ m para o surgimento da primeira fissura, o que ocasionou um número maior de

impactos quando comparado ao REF da ordem de 8,2%. Para a ruptura, este valor foi 6,2% superior. No entanto, a análise estatística pelo teste de Tukey, aplicando 95% de confiabilidade, indicou que a resistência ao impacto dos concretos REF e com adição de FS, tanto para a primeira fissura como para a ruptura, foram considerados iguais.

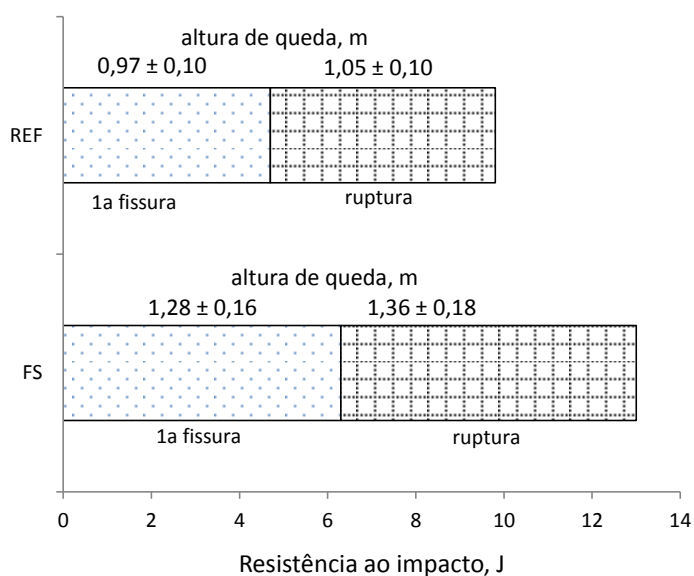


FIGURA 41 - GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FS AOS 28 DIAS DE CURA, QUANDO DO SURGIMENTO DA PRIMEIRA FISSURA E DA RUPTURA DO CP

Quando a análise estatística foi realizada entre os concretos com FC e FS, foi verificada uma igualdade quanto aos resultados de impactos; ou seja, ambos apresentaram uma maior energia, dificultando a ruptura do material. A diferença de reforço entre estas fibras pode ser explicado pelo aspecto físico das mesmas, conforme pode ser observado na FIGURA 42.

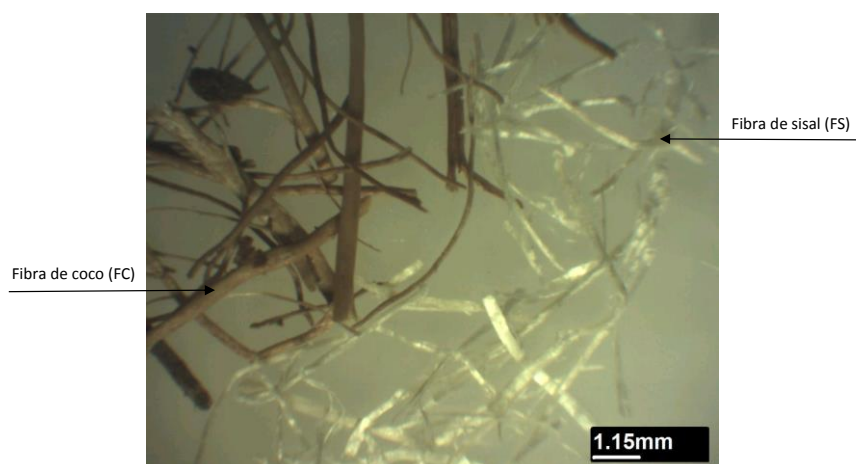


FIGURA 42 – IMAGEM DE FIBRAS DE COCO E SISAL OBTIDA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO COM AUMENTO DE 14X

O comprimento e o diâmetro das FS, identificado por SEM, variou entre 3,04 e 5,03 mm, e 0,11 e 0,32 mm, respectivamente; enquanto para as FC foi de 3,27 a 4,56 mm o comprimento das fibras, e entre 0,07 e 0,56 mm o diâmetro.



FIGURA 43 – IMAGEM DAS FIBRAS DE SISAL OBTIDAS EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO, COM AUMENTO DE 20X, APRESENTANDO ESPESSURA E COMPRIMENTO VARIADOS ENTRE 0,11 E 0,32 MM, E 3,04 E 5,03 MM, RESPECTIVAMENTE

No ensaio de resistência ao impacto foi possível verificar a influência de cada tipo de fibra, já que para os CPs com FS ocorreu desprendimento quando da ruptura, ou ainda, apenas algumas fibras mantinham o CP unido, conforme pode ser observado na FIGURA 44.

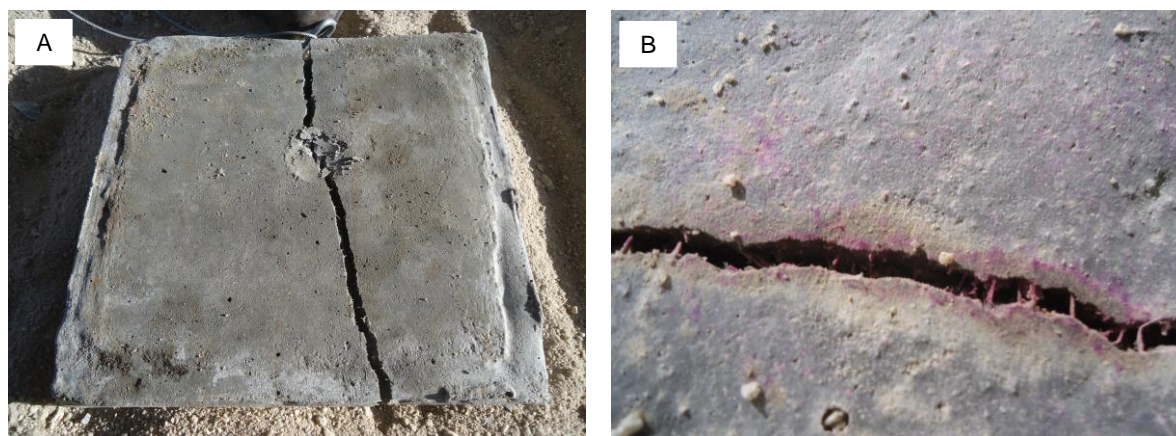


FIGURA 44 – IMAGENS DE CPS DE CONCRETO COM 0,8% FS APÓS ENSAIO DE IMPACTO: (A) RUPTURA TOTAL; (B) ALGUMAS FS MANTÊM O CP UNIDO

As fissuras observadas durante o ensaio de impacto atingiram valores entre 0,05 e 0,90 mm para o concreto com FS, de mesma amplitude que o REF. Isto também determinou uma maior resistência ao impacto para o concreto com FC, comprovando uma maior resistência ao esforço exigido. As FS, ao invés de suportarem mais a carga, aumentando as dimensões das fissuras, entraram em ruptura. Porém, em maiores alturas que o concreto REF, comprovando assim um comportamento menos frágil do que o REF.

Na FIGURA 45 está mostrada a superfície de fratura do CP de concreto com FS obtida por câmera fotográfica (A) e por microscópio estereoscópico (B), indicando a ruptura das fibras.

A FS apresentou maior resistência à tração em comparação à FC, sendo tal resultado atribuído à composição das fibras, que diferem entre si. Segundo Arsène M-A *et al.* (2003) *apud* Pacheco-Torgal & Jalali (2011), as FS são compostas por 11% de lignina, 73% de celulose, 14% de hemicelulose e 2% de extrativos e cinzas, enquanto a FC apresenta entre 20 e 36% de lignina; 43% de celulose, 12% de hemicelulose e 9% extrativos. Isto, somado ao elevado percentual de alongamento (entre 13,7 e 41,0% para a FC e de 2,1 a 4,2% para a FS), possibilitou um melhor desempenho pela interação fibra-matriz. Além disso, as saliências presentes nas FCs aumentam a sua rugosidade superficial, auxiliando na adesão com a matriz cimentícia durante o processo de cura, melhorando a tensão interfacial, e portanto, a resistência mecânica.

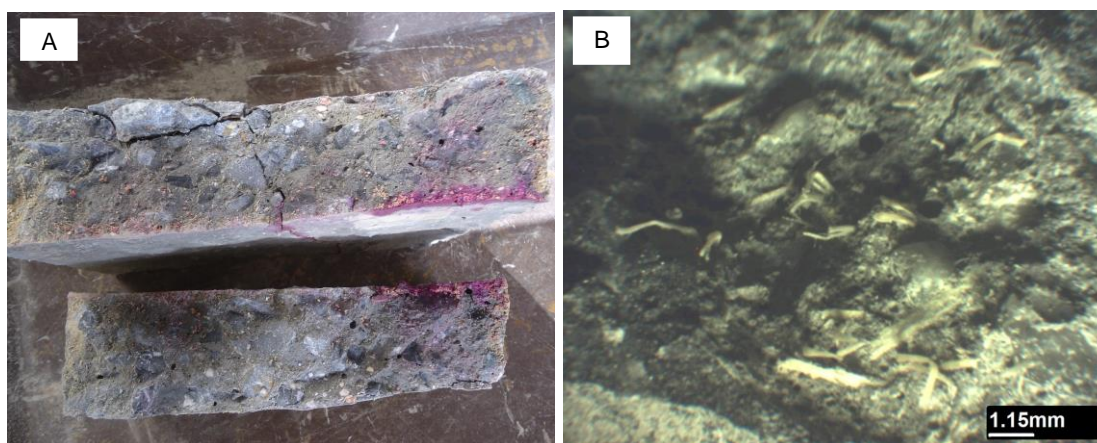


FIGURA 45 – IMAGENS DE SUPERFÍCIE DE FRATURA DE CP DE CONCRETO COM 0,8% FS APÓS ENSAIO DE IMPACTO, MOSTRANDO AS FIBRAS DISTRIBUÍDAS: (A) OBTIDA EM CÂMERA FOTOGRÁFICA; (B) AMPLIAÇÃO DA IMAGEM (A) OBTIDA EM MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPICO.

O módulo de elasticidade estático para o concreto com adição de 0,8% de FS ($27,60 \pm 0,31$) GPa foi 11,7% menor do que o do REF ($31,25 \pm 0,49$) GPa.

Os testes de resistência à tração por compressão diametral e de módulo elástico estático foram realizados aos 28 dias, conforme determinação das normas pertinentes. Como foi constatada maior dificuldade na desforma dos CPs de concreto com FS no período de 24 h, a pega deste concreto foi mais lenta. Isto pode ter proporcionado valores mais baixos para as propriedades citadas. Os valores de resistência à compressão axial foram mais elevados aos 91 dias. Este problema também foi constatado por Sedan *et al.* (2008) e Stancato *et al.* (2005), conforme citado anteriormente; onde a composição química das fibras interferiu na hidratação do cimento.

Os resultados numéricos obtidos do ensaio de abrasão hidráulica para o concreto com FS estão graficamente apresentados na FIGURA 46, comparativamente ao REF. Os valores de perda de massa para o concreto com adição de 0,8% FS foram bem superiores ao REF; 133% em 24 h, e de 87% no final do ensaio, 72 h.

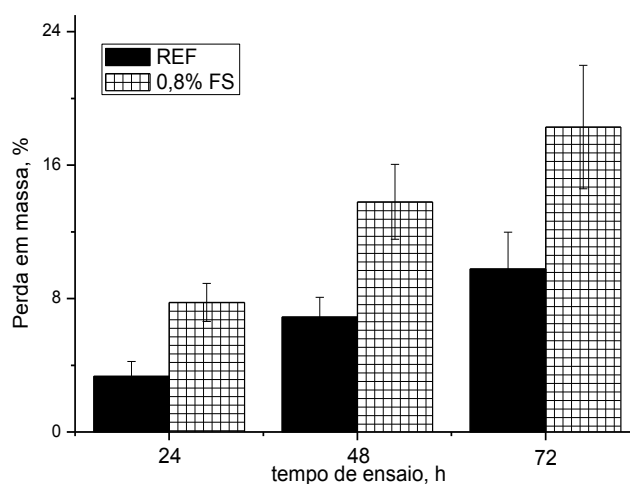


FIGURA 46 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE 0,8% FS AOS 28 DIAS DE CURA, APRESENTANDO A PERDA DE MASSA EM 24, 48 E 72 H

Para os CPs de concreto com 0,8% FS, o desgaste não ocorreu exatamente da mesma forma que com os CPs de concreto com adição de 0,8% FC e REF. Na FIGURA 47 é possível observar esta diferença: (A) em 48 h, o desgaste está mais localizado nas bordas do CP, onde o meio de abrasão tendeu a permanecer; (B) ao final do ensaio, 72 h, o aspecto físico do CP indicou um desgaste mais generalizado que às outras dosagens (REF e com FC).

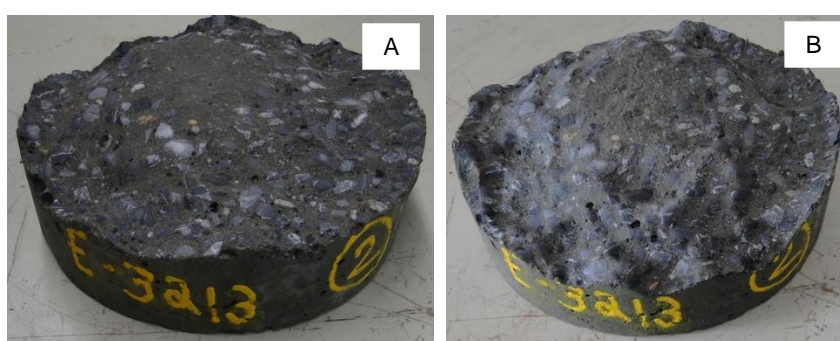


FIGURA 47 – ENSAIO DE ABRASÃO: IMAGENS DO CP DE CONCRETO COM 0,8% FS: (A) 48 H DE ENSAIO; (B) 72 H, APÓS ENSAIO

Os dados obtidos de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral aos 28 dias para as dosagens de concreto com tratamento das fibras, comparativamente às sem tratamento, estão listadas na TABELA 11. Para a resistência à compressão axial aos 28 e 91 dias, os valores com e sem

tratamento se diferenciam; o concreto produzido com FS tratada obteve desempenho inferior em 17,6 e 24,0%, respectivamente. Quanto à resistência à tração, o concreto produzido com fibras tratadas foi 26,1% superior àquele concreto em que as FS não passaram por algum tratamento.

TABELA 11 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL E À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA AS COMPOSIÇÕES REF E 0,8% FS COM E SEM TRATAMENTO

Propriedade	Concreto	Concreto com FS	
	REF	sem tratamento alcalino	com tratamento alcalino
Resistência à compressão (MPa)			
7 dias	28,20 ± 1,28	25,50 ± 2,42	26,20 ± 0,35
28 dias	35,10 ± 1,57	34,10 ± 2,40	28,10 ± 0,78
91 dias	41,00 ± 2,06	45,00 ± 5,66	34,20 ± 1,91
600 dias	46,90 ± 0,64	39,90 ± 0,99	46,80 ± 0,07
Resistência à tração (MPa)	3,24 ± 0,42	3,06 ± 0,11	3,86 ± 0,26

Concreto com CC. Os valores de resistência à compressão axial para os concretos produzidos com CC estão apresentados na FIGURA 48.

As dosagens de 3 e de 5% atenderam os valores das normas que estabelecem 31,6 MPa, sendo considerada uma margem de erro de 5%, determinada pela NBR 12655 (ABNT, 2006). O concreto com 3% de CC ultrapassou o REF no valor da resistência à compressão axial em 4,1% aos 91 dias de cura. Já, a substituição de 5% do cimento pela CC tornou o material menos resistente à compressão axial em 16,3%, também aos 91 dias de cura. Apesar desta diferença, quando analisados estatisticamente com 95% de significância, estes concretos são considerados iguais.

A dosagem de concreto com 8,5% de CC (em substituição ao cimento) alcançou apenas os valores mínimos de resistência à compressão axial para a

produção de postes de concreto, 25 MPa, conforme estabelecido pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011).

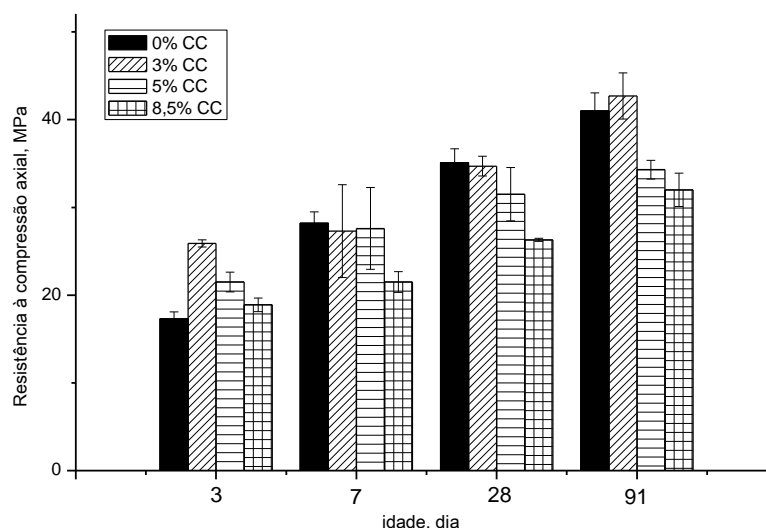


FIGURA 48 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE CC (3, 5 e 8,5%)

Aos 600 dias de cura, os CPs com 3% de CC atingiram $(46,80 \pm 1,41)$ MPa; os com adição de 5% de CC, $(34,50 \pm 2,97)$ MPa; e o REF foi de $(46,90 \pm 0,64)$ MPa.

As análises realizadas pelo teste de Tukey não indicaram diferenças significativas entre os concretos com CC e o REF.

Na TABELA 12, estão apresentados os resultados obtidos da CC para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Foi verificada, também, uma relação inversa entre a resistência à tração por compressão diametral e o teor de CC substituído.

TABELA 12 – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS REF E COM ADIÇÃO DE CC (3 e 5%) AOS 28 DIAS DE CURA

Resistência à tração por compressão diametral, (MPa)	REF	3% CC	5% CC
	$3,24 \pm 0,42$	$2,93 \pm 0,07$	$2,35 \pm 0,05$

Os módulos de elasticidade estático para os concretos com substituição de CC em 3 e 5% atingiram $(32,13 \pm 0,70)$ e $(30,00 \pm 0,52)$ GPa, respectivamente, e o

valor para o REF foi de $(31,25 \pm 0,49)$ GPa. Comparando com o REF, estes valores correspondem a um acréscimo do módulo elástico estático em 2,8% para a dosagem com 3% de CC, e um decréscimo de 4% para a dosagem com 5% de CC.

Os resultados mecânicos dos concretos produzidos com 3 e 5% de CC indicaram a sua utilização como uma alternativa para a redução da quantidade de cimento no concreto, em até 3,3% (14 kg de cimento/m³ ou 11 kg de CO₂/m³) e, portanto, do impacto ambiental ocasionado por tal na natureza.

Concreto com pintura de pasta de cimento|TiO₂

Os valores obtidos para a resistência à compressão axial dos CPs de concreto com pintura de TiO₂ estão apresentados na TABELA 13 e na FIGURA 49.

TABELA 13 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DAS DOSAGENS DE CONCRETO REF E COM PINTURA DE TiO₂

Resistência à compressão (MPa)	Concreto	
	REF	Com pintura a base de TiO ₂
7 dias	28,2 ± 1,28	25,9 ± 0,57
28 dias	35,1 ± 1,57	32,8 ± 0,28
91 dias	41,0 ± 2,06	41,3 ± 1,56

A resistência à compressão axial do concreto com pintura de TiO₂ não foi influenciada pela camada depositada.

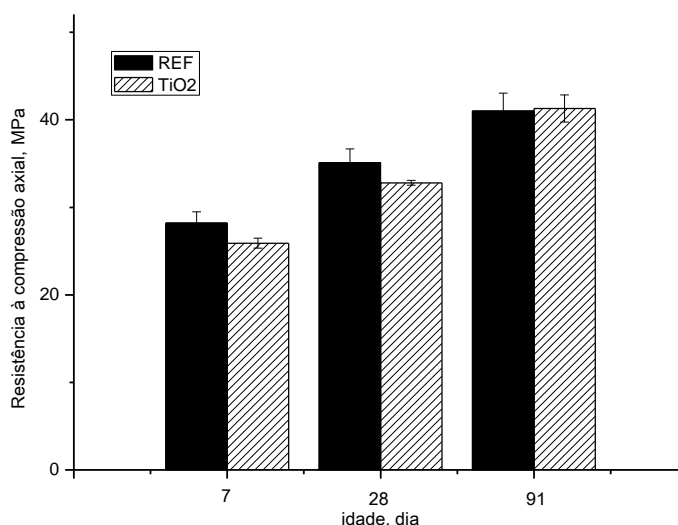


FIGURA 49 – GRÁFICO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM FUNÇÃO DO TEMPO DE CURA DOS CONCRETOS REF E COM PINTURA DE TiO_2

A resistência à tração por compressão diametral dos CPs com pintura de TiO_2 aos 28 dias de cura foi de $(3,09 \pm 0,04)$ MPa e o módulo de elasticidade estático atingiu $(30,83 \pm 0,68)$ GPa. Estes valores podem ser considerados de mesma ordem de grandeza que o REF, conforme apresentado anteriormente, e confirmados pela análise estatística pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade.

4.2.1.2 Propriedades Físicas

Os valores das propriedades físicas investigadas, o teor de absorção de água, a massa específica e o índice de vazios dos diferentes tipos de concreto estudados estão na TABELA 14.

Segundo a NBR 8451-1 (ABNT, 2011), os valores resultantes máximos em absorção de água são de 5,5% para a média dos CPs, ou 7,0% para um único CP do lote. As dosagens efetuadas não atenderam a estes limites, nem mesmo o concreto REF. Porém, foi possível verificar que parte das adições utilizadas (exceto a FC), tendeu a reduzir esta característica de absorção de água em relação ao padrão; 12,8% de redução para a dosagem com 0,8% de FS, 8,5% para a dosagem com 3% de CC e 1,7% para o concreto com superfície fotocatalítica a base de TiO_2 . Isto indicou uma melhora do material modificado.

TABELA 14 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS CONCRETOS REF, FC, FS, CC E TiO₂: ABSORÇÃO, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS

Concreto	Absorção (%)		Massa específica (kg/l)				Índice de vazios (%)	
	Após imersão	Após imersão e fervura	Real	Seca	Após saturação	Após saturação e fervura	Após saturação	Após saturação e fervura
REF	6,39	6,57	2,577	2,204	2,343	2,349	14,07	14,47
0,8% FC	7,43	8,22	2,627	2,161	2,322	2,338	16,06	17,75
0,8% FS	5,57	6,46	2,447	2,113	2,232	2,249	11,77	13,64
3% CC	5,85	6,05	2,575	2,228	2,359	2,363	13,04	13,48
5% CC	6,53	6,79	2,589	2,202	2,346	2,352	14,38	14,95
pintura TiO ₂	6,28	6,44	2,573	2,207	2,343	2,349	13,84	14,22

De acordo com os valores obtidos de massa específica para os diferentes materiais, não ocorreu uma redução nem um aumento significativo com as adições/substituições, provavelmente, pelo baixo volume de adição utilizada.

Os valores obtidos para o índice de vazios indicaram similaridade nos métodos antes e após saturação.

4.2.1.3 Permeabilidade

A permeabilidade é uma das importantes propriedades no controle da degradação do concreto. Segundo Metha & Monteiro (2008), o coeficiente de permeabilidade para um concreto de resistência moderada (produzido com agregados de dimensão máxima de 38 mm, consumo de cimento de 356 kg/m³ e a/c de 0,5) está na ordem de 10⁻¹⁰ cm/s.

Os resultados obtidos do ensaio de permeabilidade estão listados na TABELA 15. Os valores estão correspondentes ao de um concreto considerado impermeável, apesar dos teores de absorção de água obtidos, os quais podem estar relacionados ao processo de conformação do CP e da metodologia de análise. O ensaio de permeabilidade tende a avaliar a presença de poros comunicantes ou caminhos preferenciais dentro do concreto, permitindo a passagem de um fluido pelo

seu interior, enquanto o teste de absorção está relacionado ao grau de saturação dos insumos utilizados, onde o concreto drena a água para os poros e capilares. Assim, o primeiro tende a ser mais confiável para inferir a respeito da durabilidade dos artefatos de concreto (postes e cruzetas do setor elétrico), já que o ambiente de exposição propicia apenas o contato de água pela chuva, e não a submersão. Uma vez impermeável, na ausência de trincas e fissuras, o concreto tende a proteger a armadura de forma segura quanto ao ataque por íons agressivos, proporcionando um aumento do tempo de vida útil do artefato ou estrutura.

TABELA 15 – COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (k) DOS CONCRETOS REF, FC, FS, CC E COM PINTURA DE TiO_2

Concreto	k, (cm/s)
REF	2,34 E-10
0,8% FC	8,30 E-11
0,8% FS	1,34 E-10
3% CC	1,50 E-11
5% CC	6,61 E-11
Pintura TiO_2	5,75 E-12

Devido à propriedade de impermeabilidade de todos os concretos produzidos, a quantidade de água resultante no ensaio foi insuficiente para realizar a caracterização do extrato lixiviado.

4.2.2 Estudo de Durabilidade

4.2.2.1 Potencial de corrosão da armadura

Na FIGURA 50, estão apresentadas as curvas de potencial de corrosão ao longo do tempo, aproximadamente, 550 dias, para o concreto sem adição ou substituição, para os diferentes envelhecimentos: em câmara de névoa salina, de SO_2 e natural, em dessecador.

A curva de potencial de corrosão do REF com envelhecimento em câmara de névoa salina atingiu a região de 90% de probabilidade de corrosão nos primeiros 100 dias. Ou seja, uma estrutura de concreto com dosagem similar tenderia a estar comprometida ao longo do tempo de sua exposição à região marinha quando comparada com a mesma estrutura em ambiente não agressivo. Esta última estava situada na região de 10% de probabilidade de corrosão, na qual a camada protetora da armadura estava passivada.

Para o envelhecimento em câmara de SO_2 , que reproduz parcialmente um ambiente industrial, os valores de potencial estão na região de probabilidade de corrosão incerta.

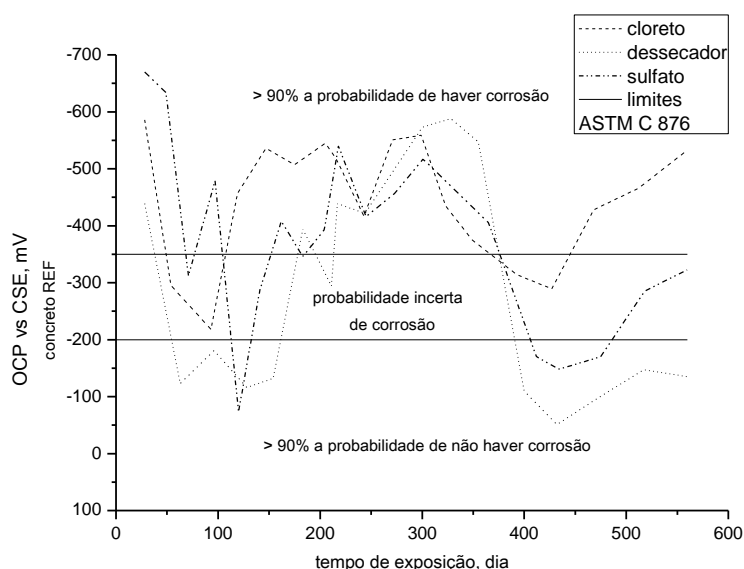


FIGURA 50 – POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS COM 0% DE ADIÇÃO EM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR, CÂMARA DE SO_2 E CÂMARA DE NÉVOA SALINA

Na FIGURA 51 estão mostradas imagens das barras de aço ou armadura após o envelhecimento natural e acelerado dos corpos de prova de concreto, sendo: no concreto REF, após envelhecimento em dessecador (A); em câmaras de SO_2 (B) e de névoa salina (C), após ruptura dos CPs.

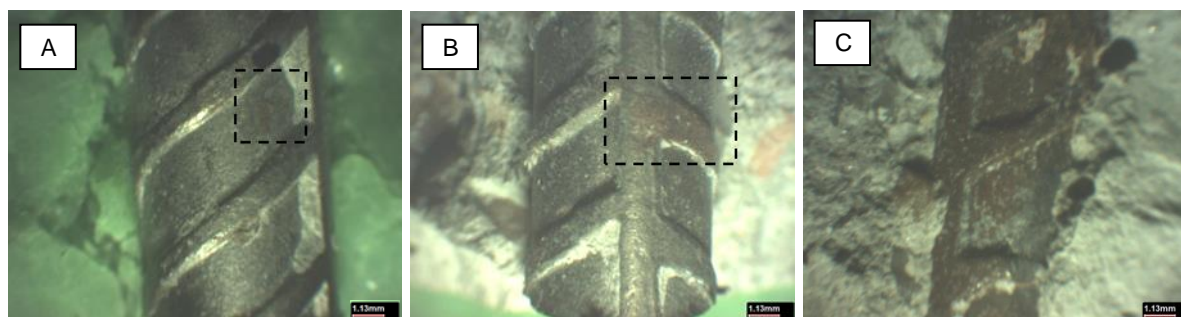


FIGURA 51 – IMAGENS DAS BARRAS DE AÇO DOS CONCRETOS REF APÓS ENVELHECIMENTO DE 560 DIAS EM DESSECADOR (A) E NAS CÂMARAS DE SO_2 (B) E NÉVOA SALINA(C)

A área de corrosão que foi observada nas barras de aço, para cada um dos envelhecimentos, corroborou com os dados obtidos de potencial de corrosão. Uma região mais afetada com produtos de corrosão foi verificada após o envelhecimento em câmara de névoa salina, o qual teve os últimos OCPs na região de maior probabilidade de ocorrência de corrosão, superior a 90%. Enquanto a região de menor probabilidade de ocorrência de corrosão, menor que 10%, foi verificada para o concreto REF, com envelhecimento em dessecador, o qual apresentou pequenas áreas de corrosão vermelha (detalhe A da FIGURA 51). E, da mesma forma, o concreto REF com envelhecimento em câmara de sulfato apresentou uma situação intermediária, com potencial de corrosão entre -200 e -350 mV, indicando uma probabilidade de incerteza de corrosão.

De acordo com Bellmann & Erfurt & Ludwig (2012), os íons sulfato tendem a reagir com os hidratos do cimento, na formação de subprodutos cristalinos de etringita, taumasita, monossulfato e hemicarbonato. Estas reações, além de reduzir o pH do material, tendem, em um primeiro momento, a promover o efeito “filler”, com preenchimento dos poros e vazios devido ao crescimento de cristais. Este fenômeno, somado ao fato do íon sulfato em questão apresentar menor mobilidade (devido ao seu tamanho molecular, quando comparado aos íons cloreto), tende a

promover a estabilidade do CP em envelhecimento, devido à ausência de interação da armadura/agente degradante. Porém, ao longo do tempo, este mesmo crescimento de cristais leva ao aumento das pressões internas, fissurando o concreto, especialmente na zona de transição da interface. Essas fissuras, então, passam a servir como “porta de entrada” ou caminho preferencial para estes (ou outros) contaminantes, levando, então, à corrosão da armadura.

Os OCPs dos CPs de concreto (REF e com as adições) estão nos gráficos da FIGURA 52 a FIGURA 63. Nestes, é possível verificar o comportamento do material em relação à sua concentração (teores de adições), comparando, também, o tipo de envelhecimento.

Os resultados obtidos indicaram que a maioria dos materiais em envelhecimento natural (dessecador) encontra-se na região de probabilidade maior que 90% de não ocorrer corrosão, ou seja, potenciais mais positivos que -200 mV. Inicialmente, os CPs apresentaram potenciais bem eletronegativos, na região de probabilidade maior que 90% de ocorrer corrosão. Este potencial permaneceu por volta de 400 dias para a sua estabilização, na sua maioria. O único material que diferiu destes valores foi o concreto com adição de CC (FIGURA 54), que foi também identificado a probabilidade incerta de corrosão. Analisando o comportamento entre os concretos com os mesmos constituintes (variação percentual) com envelhecimento em dessecador e, também, comparando com o REF, houve diferença de apenas alguns mV entre eles, que não alteraram a região de classificação da probabilidade de corrosão; exceto para a dosagem com 0,6% de FC.

Os produtos de corrosão identificados a olho nú nas barras de aço dos CPs de concreto com envelhecimento em dessecador (imagens da FIGURA 52 a FIGURA 55) são de pequena magnitude, considerados até pontuais; excetuando-se o concreto com CC, onde a área atingida é maior.

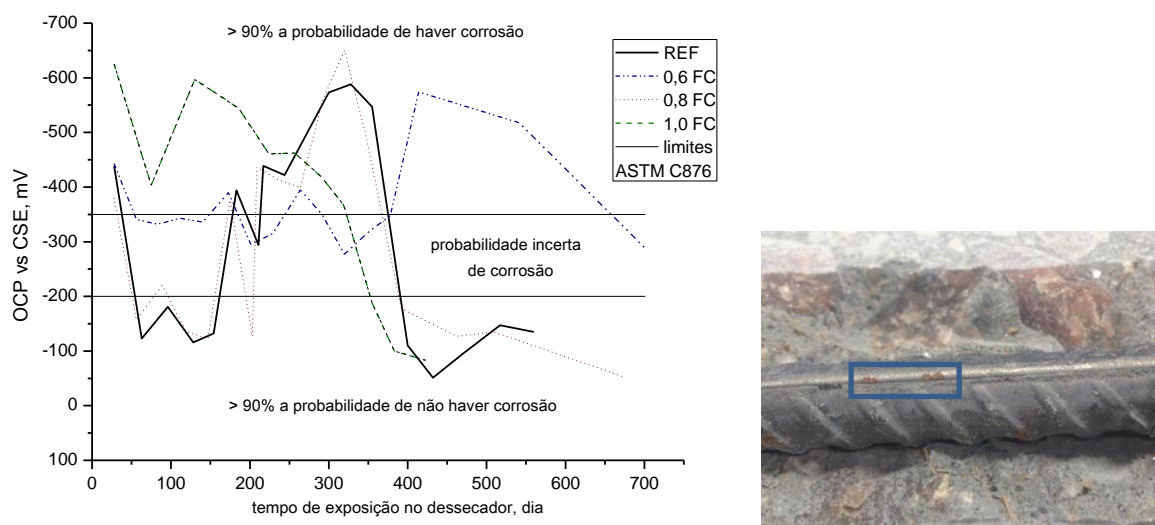


FIGURA 52 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FC COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FC APÓS ENVELHECIMENTO DE 670 DIAS EM DESSECADOR

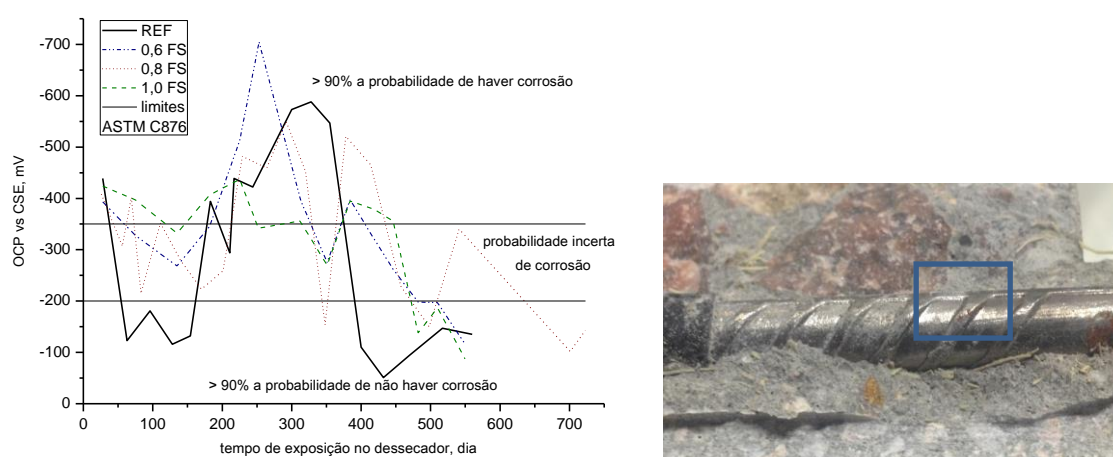


FIGURA 53 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FS COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FS APÓS ENVELHECIMENTO DE 720 DIAS EM DESSECADOR

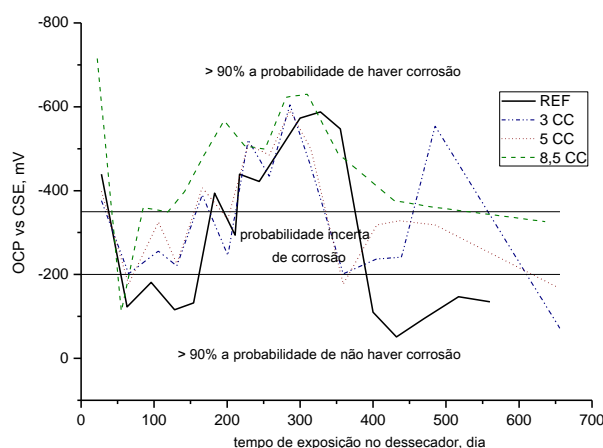


FIGURA 54 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM CC COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 5% DE CC APÓS ENVELHECIMENTO DE 650 DIAS EM DESSECADOR

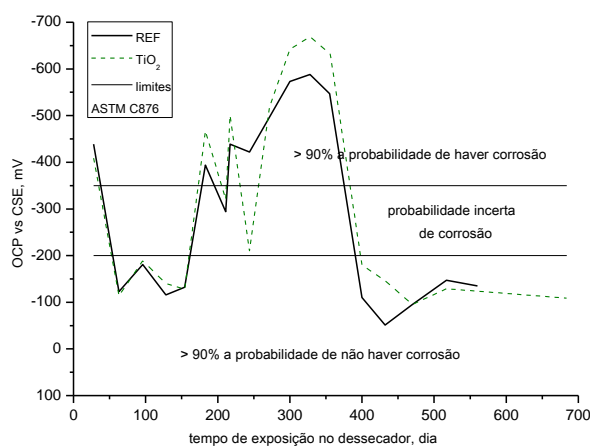


FIGURA 55 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM ARGAMASSA FOTOCATALÍTICA APÓS ENVELHECIMENTO DE 680 DIAS EM DESSECADOR

Os materiais em envelhecimento acelerado em câmara de SO_2 encontravam-se na região de probabilidade de corrosão incerta (potenciais entre -200 e -350 mV) e na região de alta probabilidade de não ocorrer corrosão (potenciais mais positivos que -200 mV) após, pelo menos, 650 dias.

Considerando a região de probabilidade de corrosão, é possível afirmar que, alguns concretos (0,8% FS e com TiO_2) apresentaram um desempenho superior ao concreto REF quanto à corrosão do material em câmara de SO_2 . Isto porque a região de probabilidade constatada foi a de 90% de não ocorrer corrosão, e não à incerta.

Estes dados são corroborados com as imagens da FIGURA 57 e da FIGURA 58, onde os produtos de corrosão são imperceptíveis a olho nú na barra metálica do concreto produzido com 0,8% de FS, quando comparado aos produtos de corrosão do concreto armado com 5% de CC.

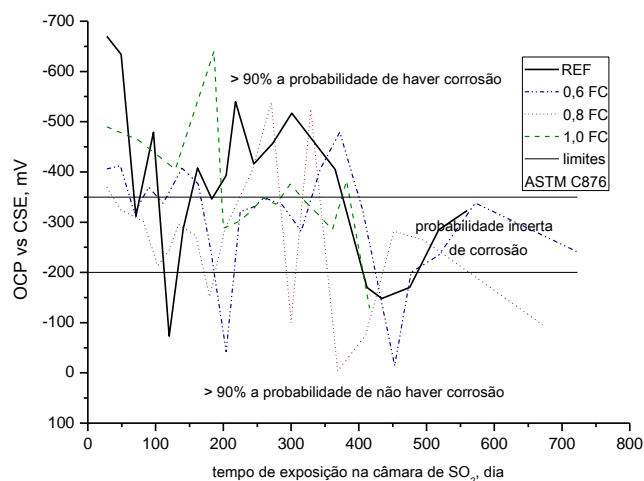


FIGURA 56 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2

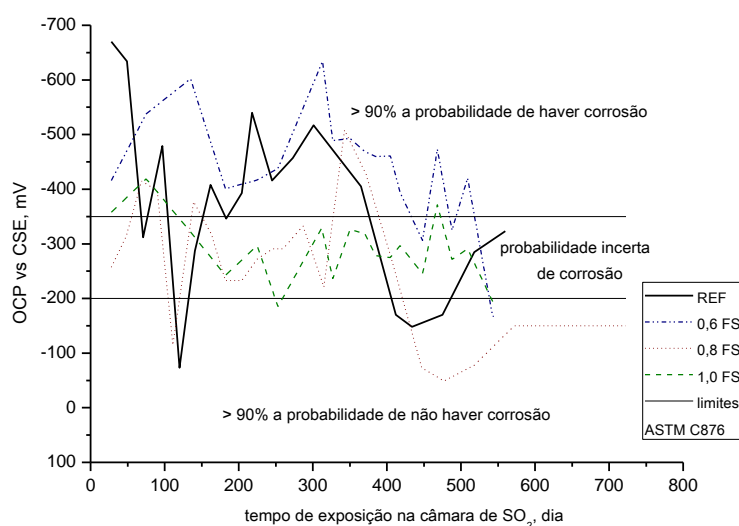


FIGURA 57 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FS COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2 , E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FS APÓS ENVELHECIMENTO DE 720 DIAS EM CÂMARA DE SO_2

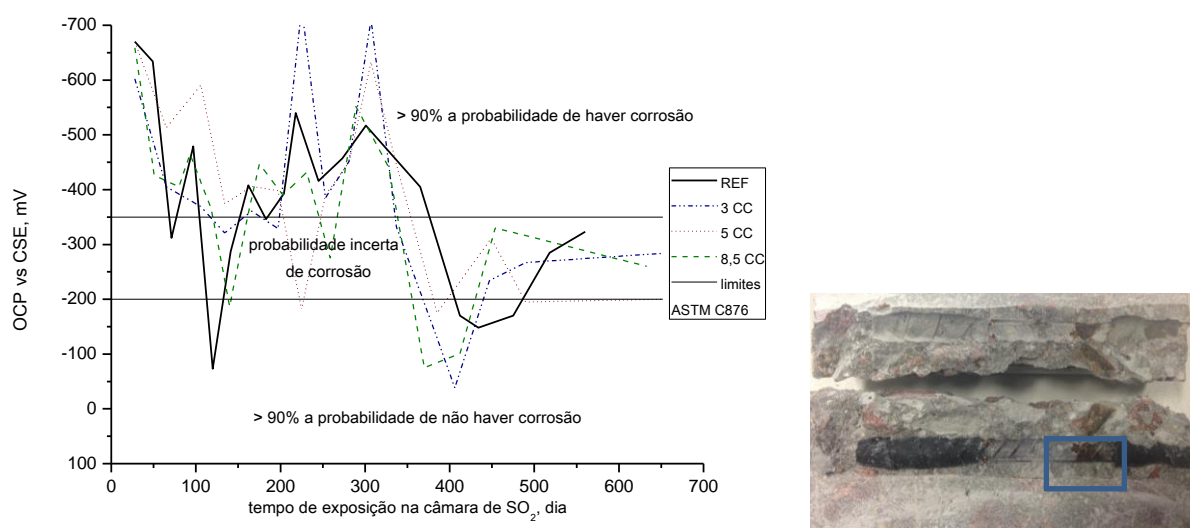


FIGURA 58 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM CC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2 ; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 5% DE CC APÓS ENVELHECIMENTO DE 650 DIAS EM CÂMARA DE SO_2

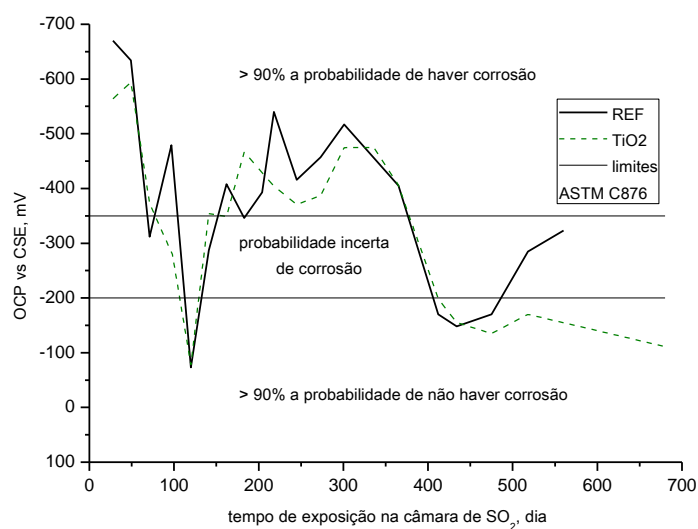


FIGURA 59 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2

Da mesma forma, os materiais em envelhecimento acelerado em câmara de íons cloreto encontravam-se na região de probabilidade de corrosão superior a 90%, ou seja, potenciais mais negativos que -350 mV. O concreto produzido com CC teve o seu comportamento estabilizado na região de maior probabilidade de ocorrência de corrosão desde os 28 dias de cura.

Visualmente, as imagens da FIGURA 60 e FIGURA 61 apresentam produtos de corrosão mais acentuados para o envelhecimento em câmara de névoa salina, quando comparados com os outros tipos de envelhecimento.

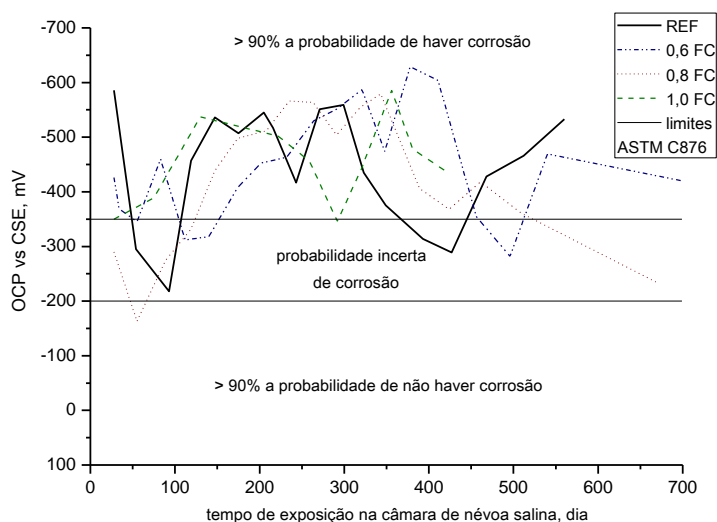


FIGURA 60 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FC APÓS ENVELHECIMENTO DE 670 DIAS EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA

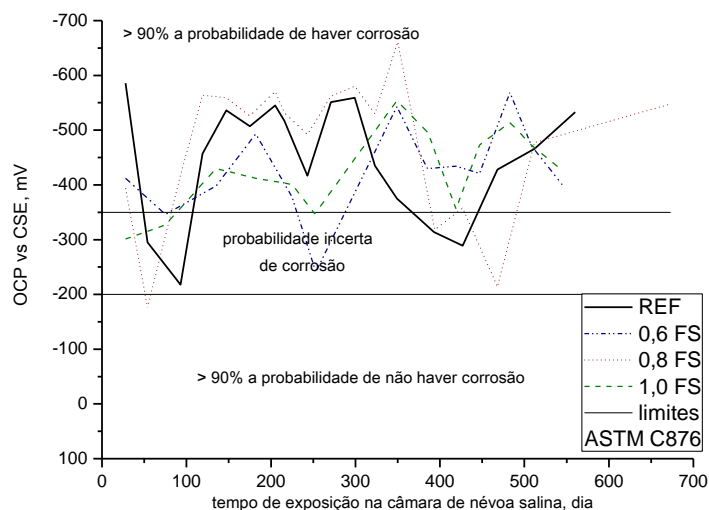


FIGURA 61 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM FS COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA; E IMAGEM DA BARRA DE AÇO DO CONCRETO COM 0,8% DE FS APÓS ENVELHECIMENTO DE 670 DIAS EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA

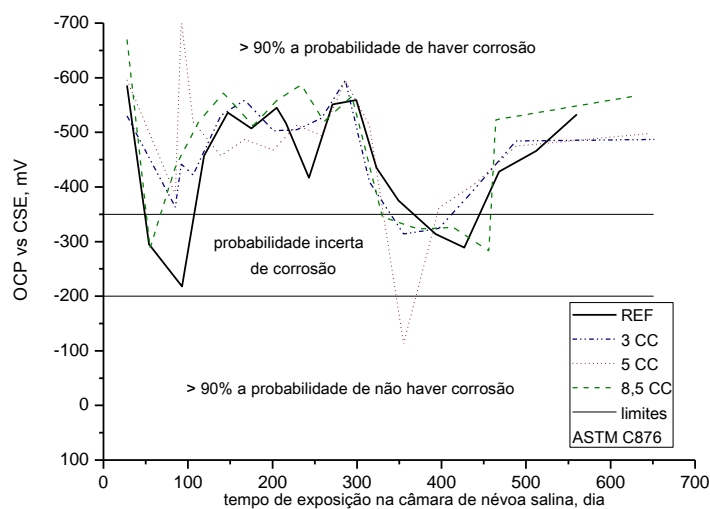


FIGURA 62 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM CC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA

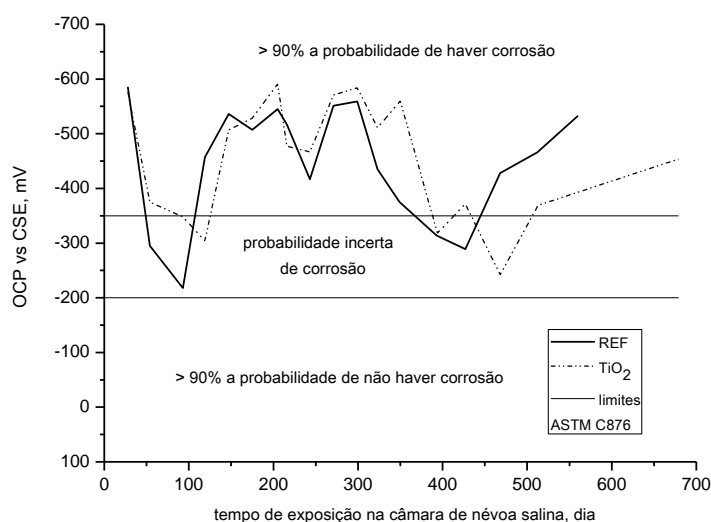


FIGURA 63 - GRÁFICO DO POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA AMOSTRAS DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO₂ COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA

A diferença nos valores de potencial de corrosão observada entre as diferentes porcentagens das adições/substituições nos concretos não alterou a região de probabilidade de corrosão estabelecida na ASTM C 876/2009, tanto para as amostras envelhecidas em câmara de névoa salina, como para a de SO₂ (exceto para a dosagem de 0,8% de FS).

Alguns fatores podem ter influenciado nas medidas de potencial de corrosão como: a carbonatação, que eleva a resistividade elétrica do concreto, tornando o OCP menos eletronegativo; e o teor de umidade do concreto, que quanto mais elevado, porém até o limiar da saturação dos poros, propicia uma maior mobilidade dos íons presentes, e isto reflete em OCP mais eletronegativo (CASCUDO, 1997). Estes podem ter sido alguns dos motivos para que os concretos com determinadas porcentagens de adição não tenham apresentado o mesmo comportamento que os demais (dosagens com: 0,6% de FC com envelhecimento em dessecador; e 0,8% de FS com envelhecimento em câmara de SO_2).

Todos os concretos produzidos apresentaram OCPs bem eletronegativos nas primeiras idades, indicando um processo de corrosão ativa. Para Rocha (2012), isto se deve à formação da película protetora da barra de aço, porém também deve ser considerada a formação dos produtos de hidratação do cimento durante este período inicial.

Vale salientar o comportamento do concreto com pintura fotocatalítica, ilustrada no gráfico da FIGURA 64. Este concreto apresentou a mesma região de probabilidade de corrosão quando envelhecido em dessecador como em câmara contendo os íons sulfato. Isto sugere um bom desempenho do material frente aos íons sulfato.

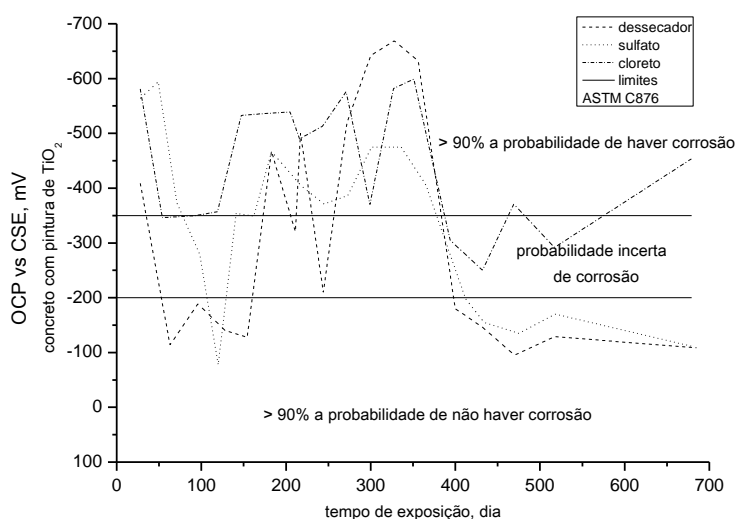


FIGURA 64 – POTENCIAL DE CORROSÃO AO LONGO DO TEMPO PARA CPS DE CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA À BASE DE TiO_2 , EM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR, CÂMARA DE SO_2 E CÂMARA DE NÉVOA SALINA

Desta forma, os resultados obtidos para todos os concretos com envelhecimento em câmara de névoa salina indicaram a provável deterioração do aço dentro do concreto; enquanto que os resultados obtidos no envelhecimento em dessecador indicaram que a camada protetora da armadura está passivada. Para a condição da câmara de SO_2 , os valores provavelmente apontam para corrosão incerta, sendo então necessários ensaios suplementares para avaliação da durabilidade do material.

Como recomendado na ASTM C 876, este critério de probabilidade de corrosão é indicativo e deve ser complementado com estudo adicional de avaliação das barras de aço depois do envelhecimento acelerado para a certificação das observações e dos resultados.

4.2.2.3 Microestrutura

Microestrutura da armadura (barra metálica).

O processo de corrosão das barras metálicas inseridas nos concretos envolveu a entrada de íons agressivos, o Cl^- e o SO_2^{2-} ; um no envelhecimento em câmara de névoa salina e o outro em câmara de SO_2 , respectivamente. Estes íons promoveram a diminuição da alcalinidade na solução de poros, reduzindo o pH e propiciando a dissolução do ferro, ou seja, a camada passiva foi rompida.

Assim, após o processo de corrosão ter iniciado, os produtos de corrosão formados se acumularam primeiramente na superfície do metal, e após, preencheram os espaços vazios, ou seja, os poros do concreto na região adjacente à barra. Como estes produtos geralmente ocupam um espaço maior do que o metal base, aproximadamente 5 vezes, ocorreu um aumento de volume considerável, o que gerou uma pressão no concreto e, então, o aparecimento de fissuras. Essas fissuras aparecem longitudinalmente ao longo da barra, e em consequência, trincam, deslocam e desintegram o concreto.

Segundo Bartolo-Perez (2000), a barra metálica perde a passividade e transforma seus componentes em produtos de corrosão complexos por reações de

hidrólise e oxidação, os quais são dependentes da estabilidade e da composição do aço, do pH e da temperatura.

A morfologia, obtida por SEM, dos produtos de corrosão das barras metálicas investigadas correspondem à magnetita (Fe_3O_4), lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$), e goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), por analogia a diversas pesquisas (ANTUNES & COSTA & FARIA, 2003; DUFFÓ *et al.*, 2004; VERA *et al.*, 2009), além de akaganeita na interface aço/concreto quando do envelhecimento em névoa salina (KOLEVA *et al.*, 2008).

Foi possível constatar, também, a presença de uma camada compacta e de regiões mais porosas. A primeira, denominada de magnetita, é formada em contato direto com o substrato, e é a própria camada de passivação, que apresenta pH neutro e crescimento em camadas; pode ser identificado nas micrografias da FIGURA 65. Enquanto as regiões mais porosas identificam as fases lepidocrocita e goetita.

A camada de óxidos da fase lepidocrocita é formada por pequenos glóbulos cristalinos denominados cristais arenosos, ou por placas finas formando uma estrutura de flores; enquanto a fase goetita apresenta estrutura globular, conhecida como bolas de algodão, as quais podem estar conectadas por ninhos, onde possivelmente têm-se mais fases dos óxidos (ANTUNES & COSTA & FARIA, 2003).

A barra metálica retirada do concreto REF com envelhecimento em câmara de névoa salina por 560 dias apresentou uma região predominante com produtos de corrosão com tonalidades mais escuras, conforme FIGURA 65(A) e FIGURA 65(B), sendo a olho nú, marrons avermelhadas. Também foi possível identificar a presença da camada com fase magnetita (FIGURA 65C). Foi observada uma camada irregular com o crescimento de estruturas em flores, uma das características da fase lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$) na FIGURA 65(D).

Para a condição do concreto REF em câmara de névoa salina, não foi identificado, por EDS, a presença de Cl na barra de aço e nos óxidos formados. Para todas as fases morfológicas identificadas, foram constatados, predominantemente, os elementos Fe e O, os quais são também, constituintes da camada de óxidos.

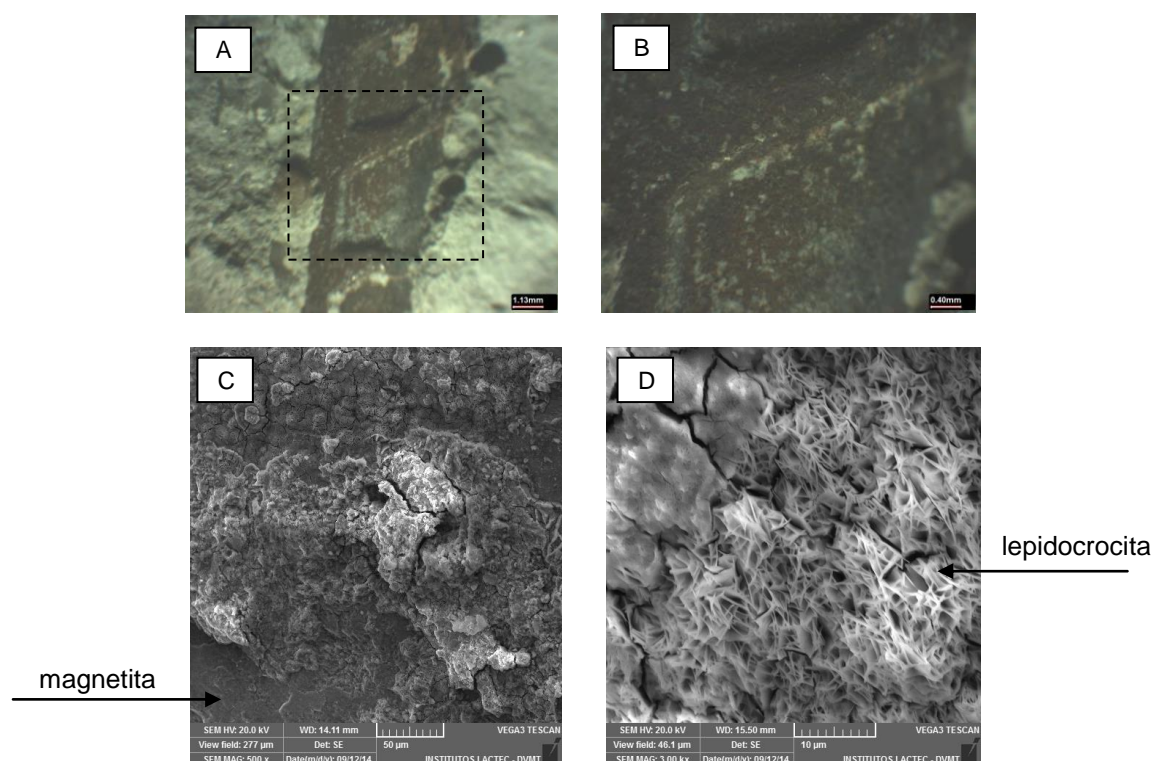


FIGURA 65 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 560 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 40X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO: MAGNETITA, GOETITA E LEPIDOCROCITA; (D) DETALHE DA IMAGEM C

Na barra metálica retirada do concreto com adição de FC em câmara de névoa salina foi identificada uma região predominante de óxidos de ferro com coloração alaranjada; mas também foi possível verificar a presença do substrato do aço, identificada na FIGURA 66(A). Morfologicamente foi caracterizada pela camada compacta da magnetita FIGURA 66(C), onde cresceram os cristais de goetita no formato de bolas de algodão e de lepidocrocita como agulhas formando flores (FIGURA 66 D, E e F).

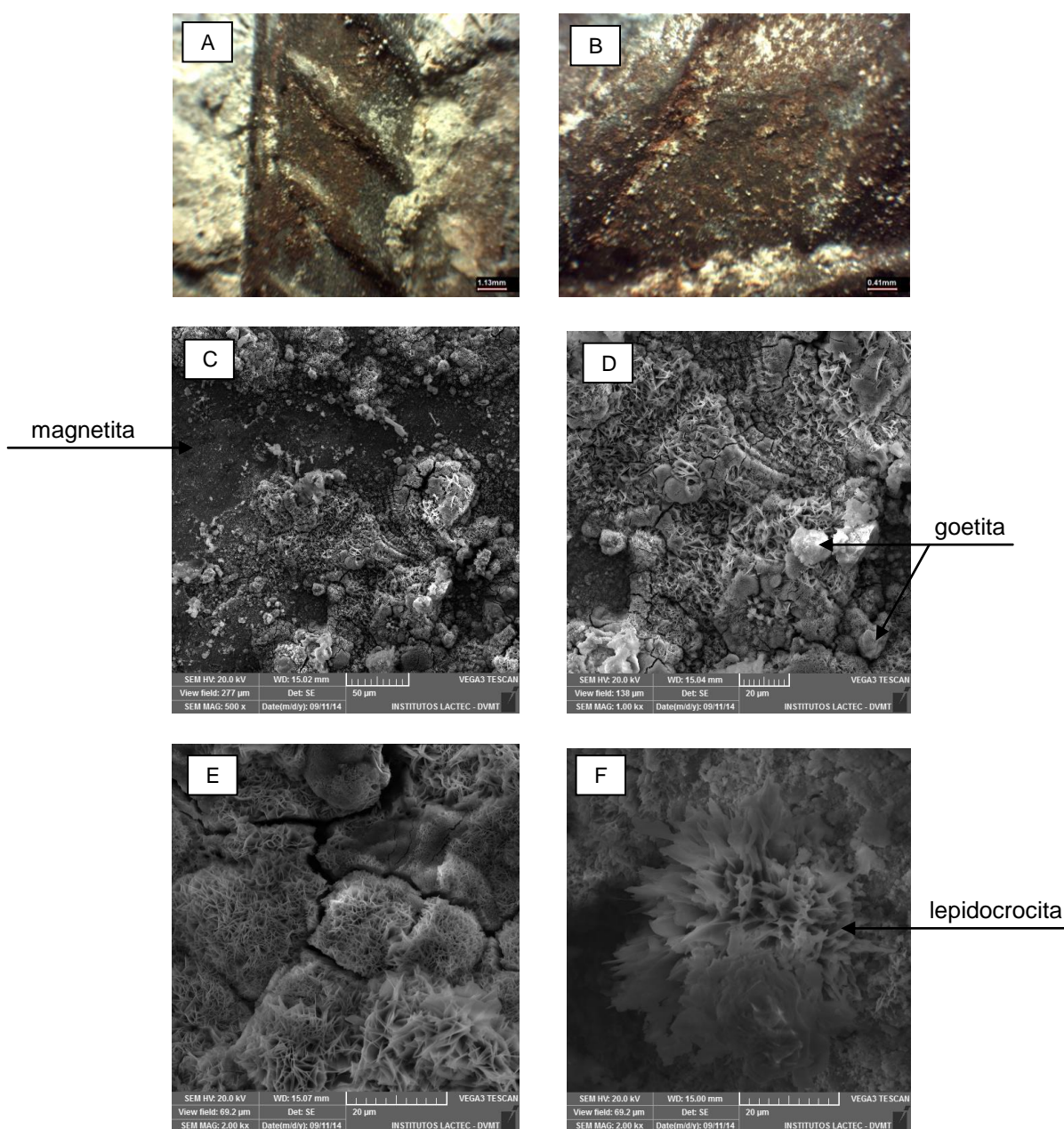


FIGURA 66 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FC ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 40X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO: MAGNETITA, GOETITA E LEPIDOCROCITA; (D) DETALHE DA IMAGEM C; (E) FASE LEPIDOCROCITA EM FORMATO DE FLORES; (F) DETALHE DA LEPIDOCROCITA EM FORMA DE FLOR

Pelo espectro obtido por EDS da lepidocrocita em formato de flor da FIGURA 66-F foram identificados os elementos Cl e S nas proporções de 0,8 e 0,5%, respectivamente. Para o espectro de EDS obtido por área total (500x), os produtos de corrosão tinham 1,8% de Cl, e a quantidade de S desprezível. Na FIGURA 67 está apresentado o mapa multi-elementos e a distribuição destes, com

detalhe para o elemento Cl, demonstrando a sua difusão pela espessura da camada de concreto até a armadura.

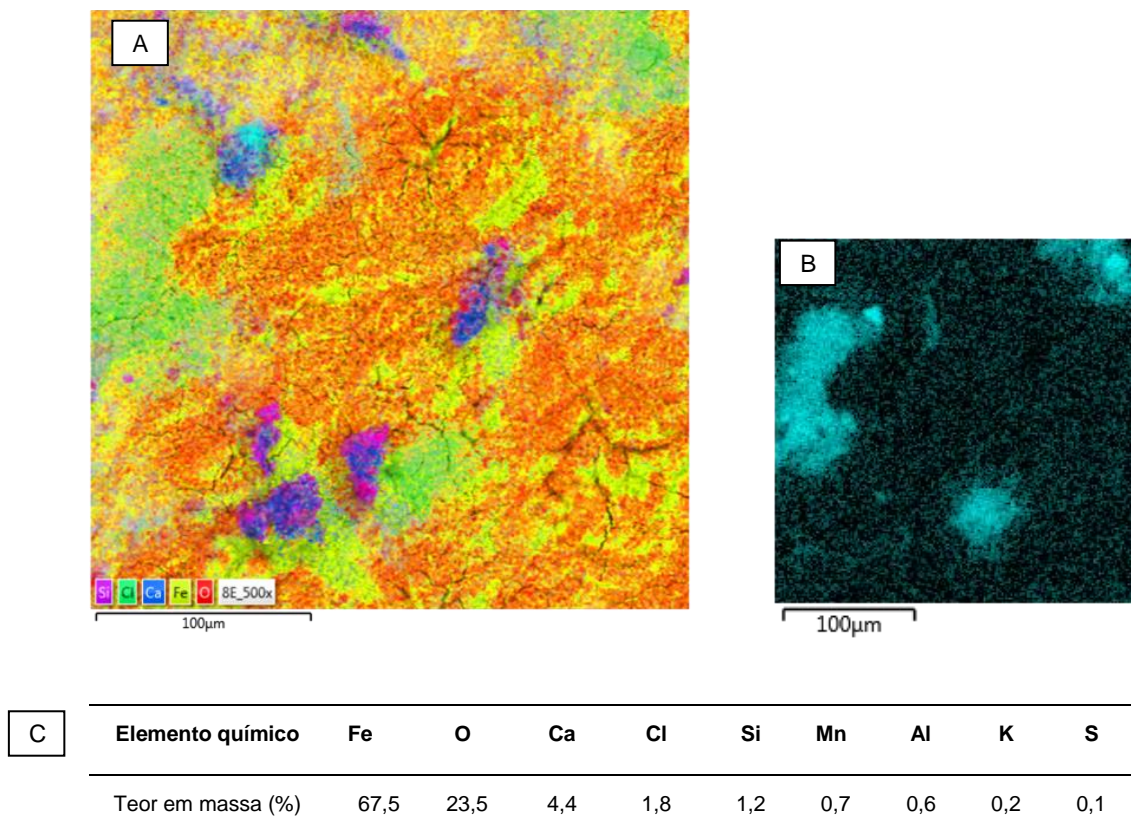


FIGURA 67 – MAPA OBTIDO POR EDS DOS PRODUTOS DE CORROSÃO DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FC ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) MULTI-ELEMENTOS; (B) DISTRIBUIÇÃO DO Cl; (C) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS OBTIDO POR ÁREA TOTAL

O processo de reação dos íons de cloro e a correspondente cinética do mecanismo são afetados pelo tamanho dos vazios e sua continuidade. Como o tamanho dos íons Cl^- ($3,62 \text{ \AA}$) são bem menores que os poros do concreto (de ar entre 10^5 a 10^8 \AA ; capilares entre 10^4 a 10^5 \AA ; e de gel, em torno de 20 \AA), estes facilitam a entrada e difusão dos íons citados (DOTTO, 2006).

As micrografias obtidas de barra de aço retirada de CP de concreto com adição de FS e envelhecimento em névoa salina por 670 dias indicou a presença de corrosão, mas não generalizada; e sim, em duas regiões distintas, conforme FIGURA 68. Uma das camadas de óxidos de ferro da FIGURA 68(A) e (B) é mais

densa, típica de corrosão preta, enquanto a da FIGURA 68(C) e (D) é bem porosa e de coloração alaranjada.

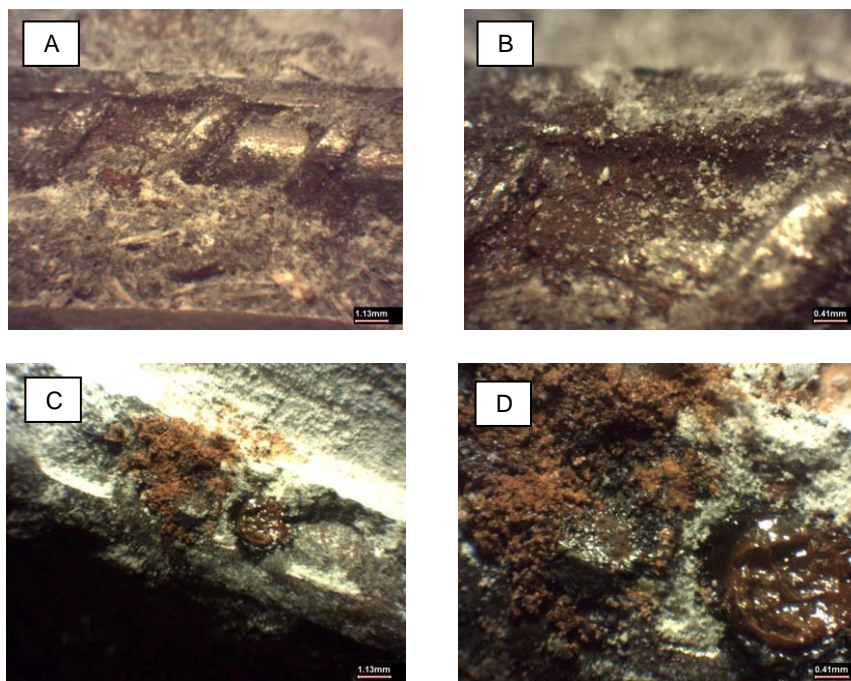


FIGURA 68 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FS ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) E (B) COM AUMENTO DE 14X, EM DUAS REGIÕES DISTINTAS; (C) E (D) DETALHE DAS IMAGENS (A) E (B) COM 40X DE AMPLIAÇÃO

Na FIGURA 69, a micrografia do concreto armado com 0,8% de FS corresponde à interface metal/concreto. Um perfil de elementos químicos, obtido por EDS perpendicularmente à barra, propiciou a identificação dos óxidos de ferro e da região cimentícia, conforme ilustrado na FIGURA 70.

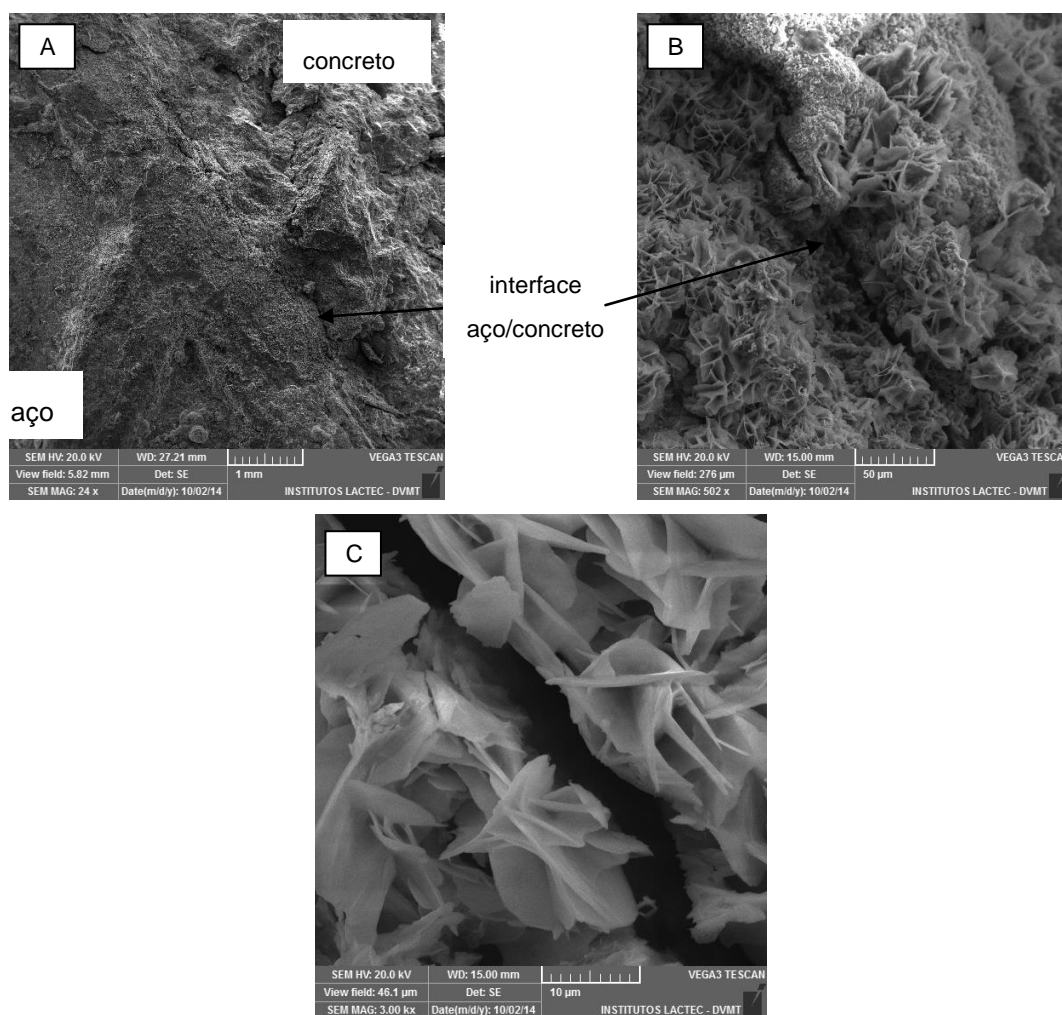


FIGURA 69 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 0,8% DE FS ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS, MOSTRANDO A INTERFACE AÇO/CONCRETO: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 24X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (C) DETALHE DA INTERFACE COM AUMENTO DE 3000X

Os óxidos de ferro oriundos do processo de oxi-redução migraram para o concreto, conforme espectros de Fe e Ca da FIGURA 70. O perfil de Cl⁻ indicou a presença deste ao longo da amostra.

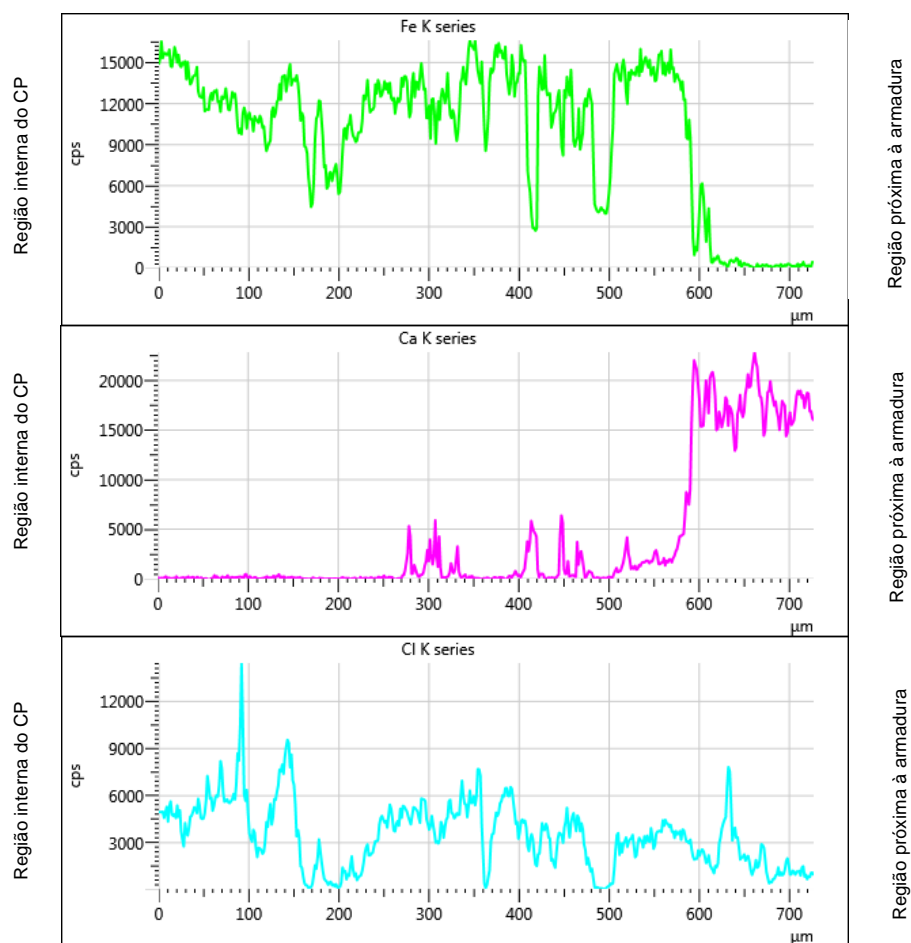


FIGURA 70 – PERFIL DE ELEMENTOS QUÍMICOS (Fe, Ca E Cl) DE AÇO/CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FS, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS

Na FIGURA 71 estão apresentadas as micrografias dos óxidos de ferro obtidas para a armadura de concreto reforçado com FS, com envelhecimento em câmara de névoa salina. No item (B), têm-se diferentes camadas de óxidos, formadas e transformadas ao longo do tempo. Os cristais da imagem são compostos, principalmente, pelos elementos Fe, O, C e Cl, conforme espectro da FIGURA 71(E).

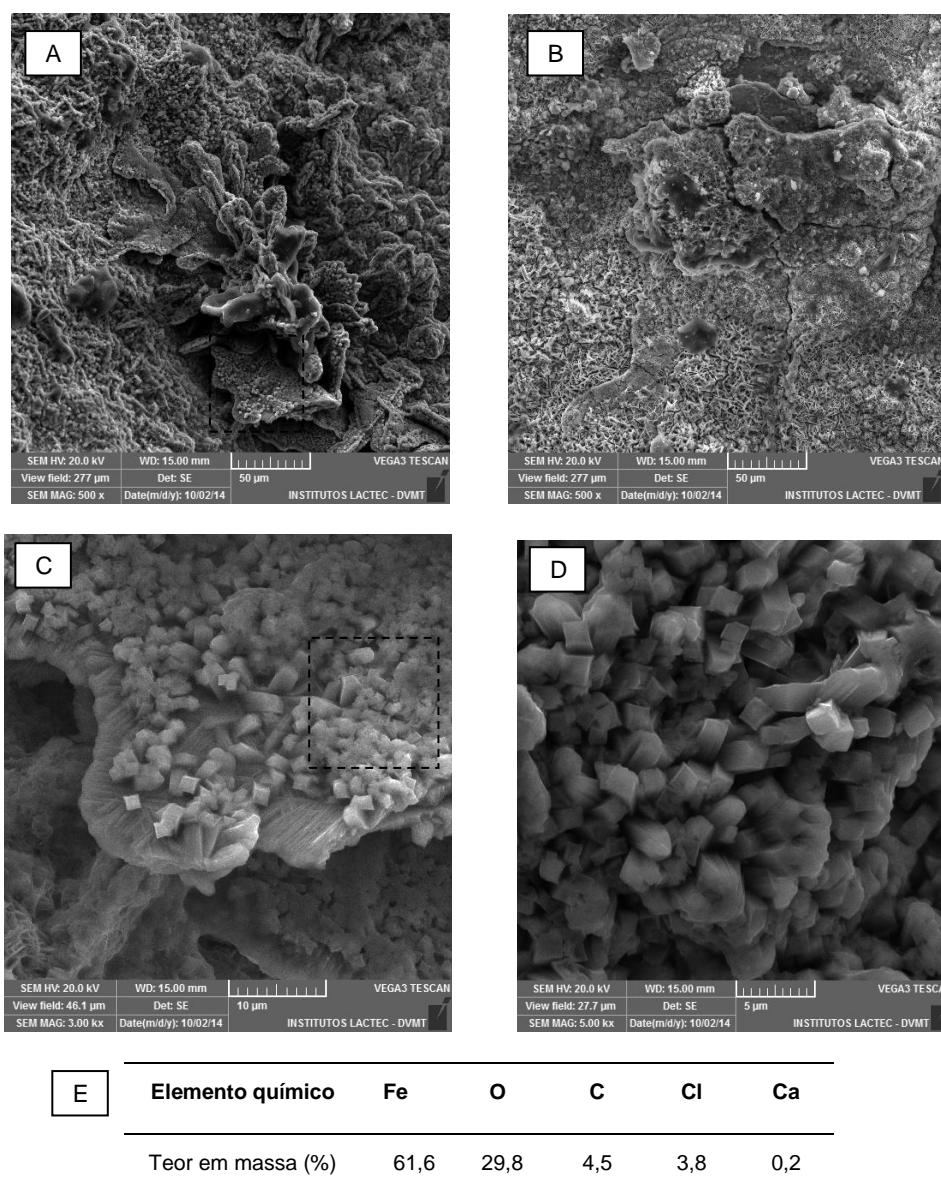


FIGURA 71 – MICROGRAFIAS DOS ÓXIDOS DE FERRO DE CP DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE 0,8% DE FS ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 670 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 500X, MOSTRANDO AS DIVERSAS CAMADAS DE ÓXIDOS; (C) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AUMENTO DE 3000X; (D) DETALHE DA IMAGEM (C) COM AUMENTO DE 5000X; (E) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DOS CRISTAIS DA IMAGEM (D) OBTIDOS POR EDS

A barra de aço retirada do CP de concreto produzido com 5% de CC e com envelhecimento em câmara de névoa salina durante 645 dias apresentou corrosão pontual e distribuída na coloração preta e laranja. A sua micrografia está apresentada na FIGURA 72 (A) e (B), enquanto as morfologias dos produtos de corrosão estão na FIGURA 72(C).

Os produtos de corrosão foram identificados como magnetita, caracterizada pela camada mais densa e escura, enquanto as mais porosas são a goetita em forma de bolas de algodão, e a lepidocrocita como se fossem flores. Todos estes óxidos são constituídos de Fe, O e H; o que diferencia é a fase (α , γ e β).

O envelhecimento em câmara de névoa salina não propiciou a difusão total dos íons Cl^- , já que por EDS foi identificado apenas duas regiões com concentração de Cl^- (marcadas na FIGURA 72-C), e mesmo assim, com apenas 0,3%, que provavelmente são provenientes da composição química da cinza.

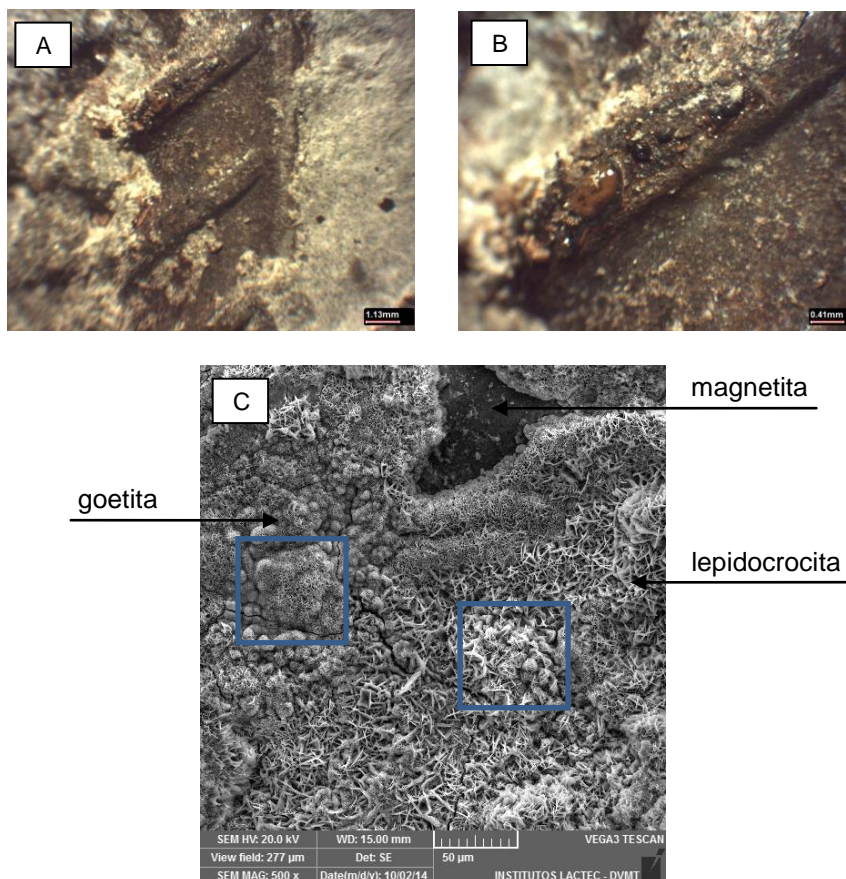


FIGURA 72 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO PRODUZIDO COM CC E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 645 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) EM 40X; (C) ÓXIDOS DE FERRO COMO PRODUTOS DE CORROSÃO (MAGNETITA, GOETITA E LEPIDOCROCITA)

Na FIGURA 73 constam as micrografias da barra de aço retirada do concreto armado produzido com pintura de TiO_2 e envelhecido em câmara de névoa salina por 680 dias.

A barra metálica apresenta produtos de corrosão porosos de cor laranja e preta, como a magnetita e a lepidocrocita. Na FIGURA 73(E) está representada a fase lepidocrocita, variando de 16,41 a 22,30 μm . As trincas, que são características de produtos de corrosão expansivos, estão na FIGURA 73(D).

A técnica de EDS propiciou determinar a concentração dos elementos químicos ao longo das camadas de óxidos formadas sobre o aço. Para este concreto armado, com pintura superficial de TiO_2 , foi identificado, no máximo, 0,7% de Cl^- .

A quantidade de íons cloreto necessária para despassar a armadura está relacionado à concentração de íons hidróxidos presentes nos poros, segundo Metha & Monteiro (2008). O valor limite para o quociente entre as concentrações de íons cloreto e hidróxido é 0,6; o que corresponde a 0,2% de cloretos (em massa) relativamente ao cimento, ou 0,05% em relação à massa de concreto.

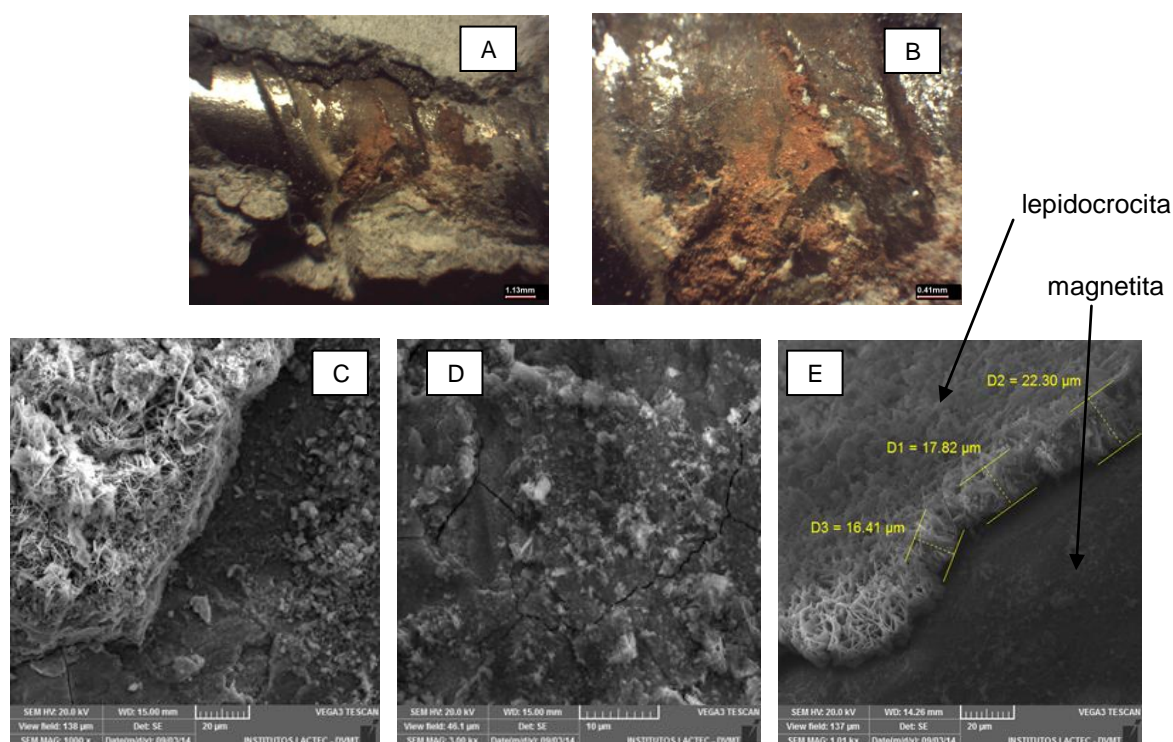


FIGURA 73 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM PINTURA DE TiO_2 ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA DURANTE 680 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) EM 40X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO; (D) MAGNETITA E LEPIDOCROCITA EM FORMATO DE FLOR; (E) LEPIDOCROCITA EM CAMADAS

Não foi possível obter a composição dos produtos de corrosão por XRD, pelo pequeno volume acumulado ao longo de 3,5 cm (comprimento da área exposta), mesmo para o envelhecimento em névoa salina.

Na FIGURA 74 estão apresentadas as micrografias da barra metálica do concreto REF com envelhecimento em câmara de sulfato durante 560 dias.

A forma de agressão do SO_2 é menos intensa que a da névoa salina para o aço, visualmente. O desgaste deste concreto apresentou apenas a magnetita como produto de corrosão, sendo uma corrosão do tipo localizada de coloração marrom alaranjada (FIGURA 74-A e FIGURA 74-B).

A micrografia da FIGURA 74-D apresenta morfologia diferente na parte central, no entanto, é a pasta cimentícia aderida na barra, conforme análise feita por EDS. A concentração máxima identificada por esta técnica para o S foi de 0,1%, valor este desprezível.

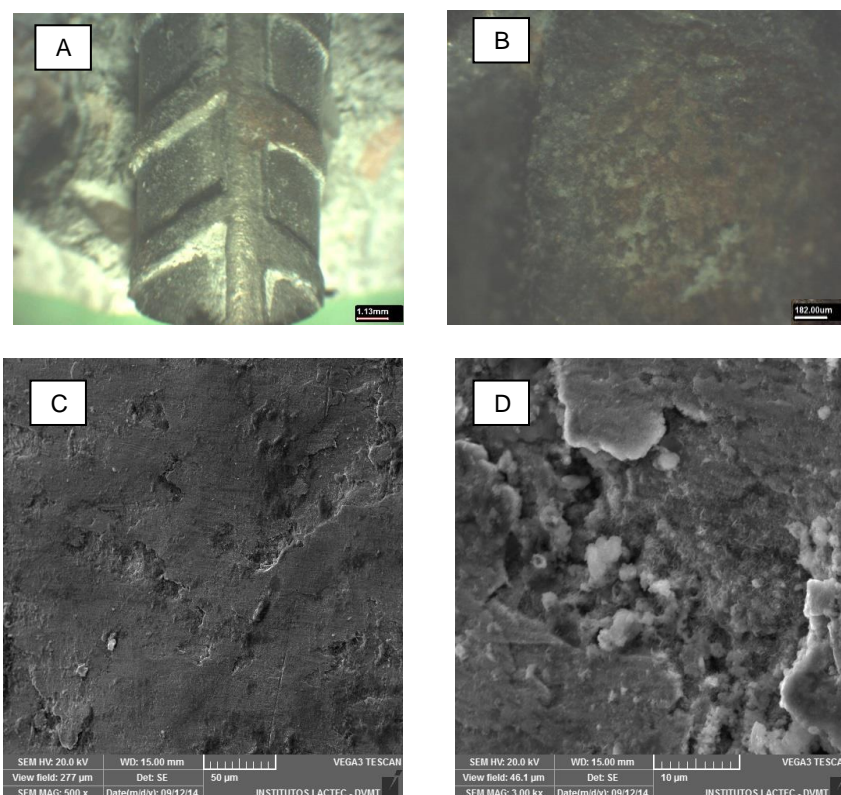


FIGURA 74 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 560 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 14X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 90X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (D) COM AMPLIAÇÃO DE 3000X

Na FIGURA 75 constam as microestruturas do concreto armado com adição de 0,8% de FC com envelhecimento em câmara de sulfato. Nas imagens A e B identifica-se a oxidação em coloração marrom alaranjada na barra metálica, com ampliação de 14 e 90x. As demais imagens mostram diferentes produtos de corrosão, como a magnetita, goetita e lepidocrocita.

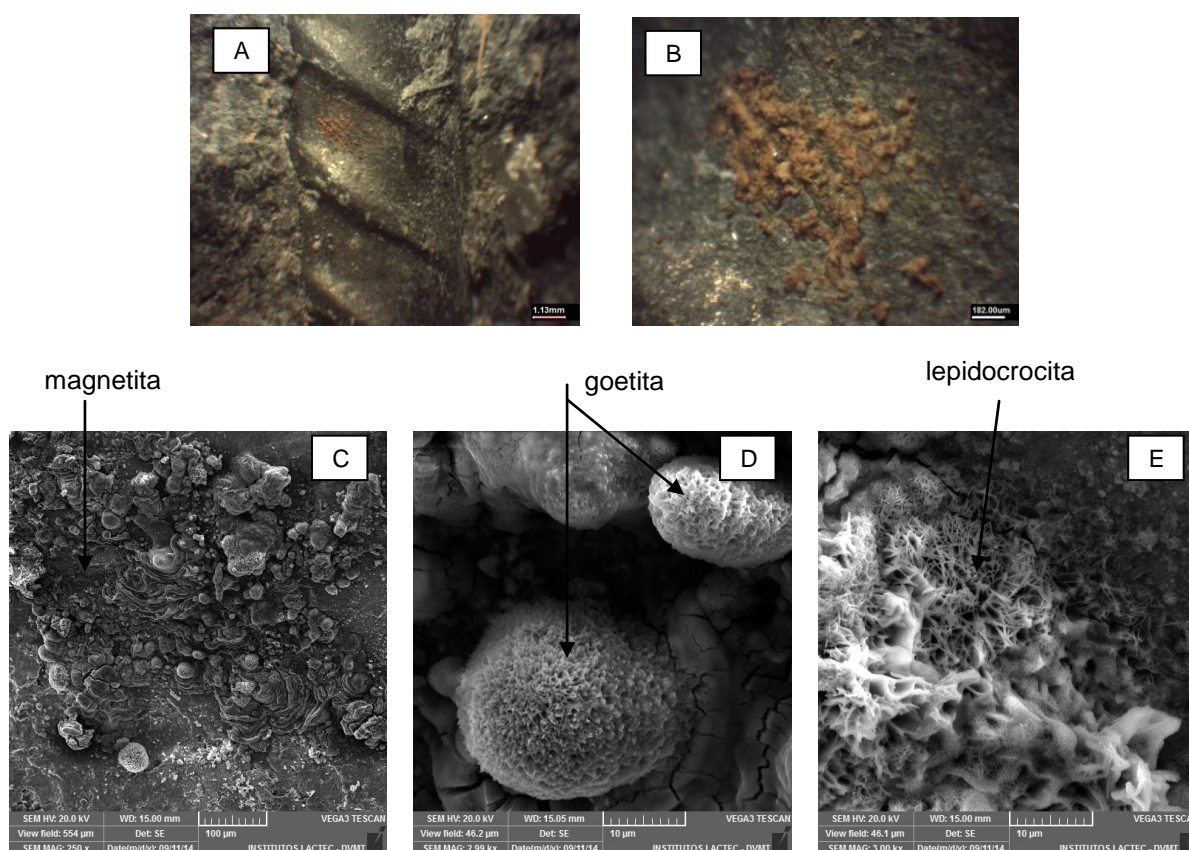


FIGURA 75 –MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REFORÇADO COM FC E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 670 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 14X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 90X; (C) PRODUTOS DE CORROSÃO COM AMPLIAÇÃO DE 250X; (D) COM AMPLIAÇÃO DE 3000X, DETALHE DA IMAGEM (C); (E) COM AMPLIAÇÃO DE 3000X, O ÓXIDO DE FERRO DENOMINADO LEPIDOCROCITA

Nas imagens da FIGURA 76 constam o aspecto visual da barra metálica do concreto com adição de FS e a respectiva morfologia. Os produtos de corrosão são em menor quantidade do que em envelhecimento em névoa salina, conforme FIGURA 76-D. É possível identificar somente a magnetita, o Fe_3O_4 , um óxido não tão expansivo como a goetita e a lepidocrocita. O íon S^{2-} foi detectado por EDS na porcentagem máxima de 0,3% nos produtos de corrosão.

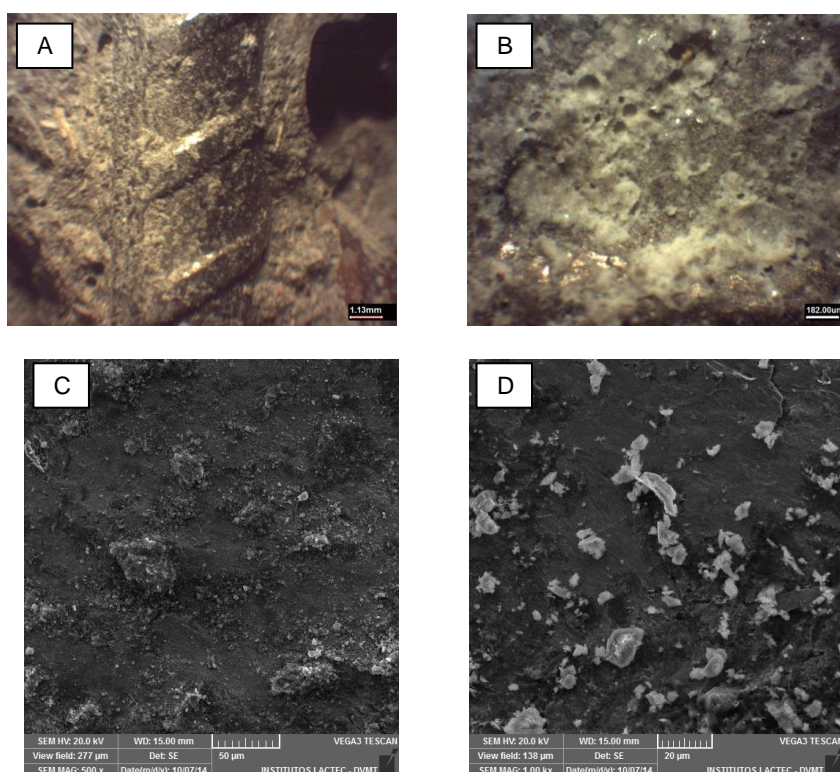


FIGURA 76 – MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO REFORÇADO COM FS E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 720 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 14X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 90X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X; (D) DETALHE DOS PRODUTOS DE CORROSÃO, COM AMPLIAÇÃO DE 1000X

Na FIGURA 77 estão apresentadas as micrografias da barra metálica (armadura) do concreto com adição de 5% de CC. É possível identificar uma corrosão localizada, no entanto, aparentemente mais acentuada do que àquela de envelhecimento em névoa salina, e com produtos de corrosão de diferentes morfologias. Estes foram identificados por EDS como óxido de ferro, e apresentam morfologias de magnetita, goetita e lepidocrocita. Estes dois últimos são expansivos.

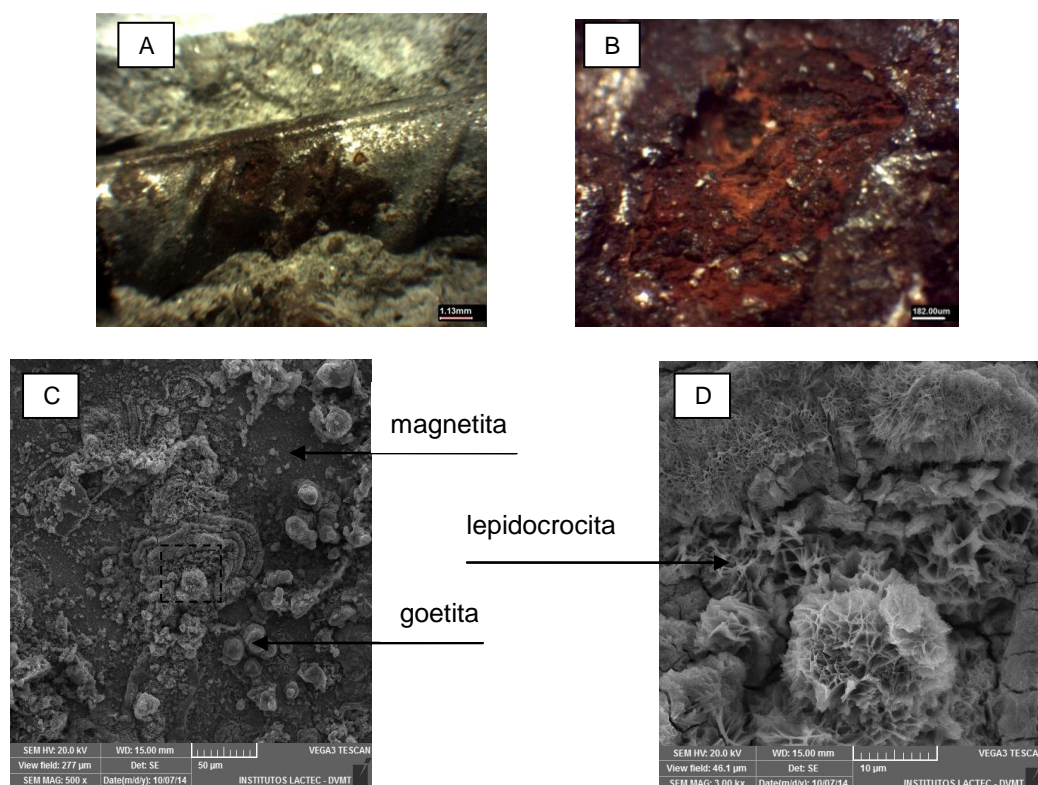


FIGURA 77 –MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO PRODUZIDO COM 5% CC E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 650 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 90X; (C) ÓXIDOS DE FERRO COMO PRODUTOS DE CORROSÃO; (D) DETALHE DA IMAGEM C

Na FIGURA 78 constam micrografias da barra metálica retirada de CP de concreto com pintura fotocatalítica envelhecido em câmara de SO_2 . Foi identificado por EDS também a presença da pasta cimentícia, além do óxido de ferro compacto, a magnetita. A concentração máxima de S^{2-} na camada de óxidos da barra foi de 1,0%.

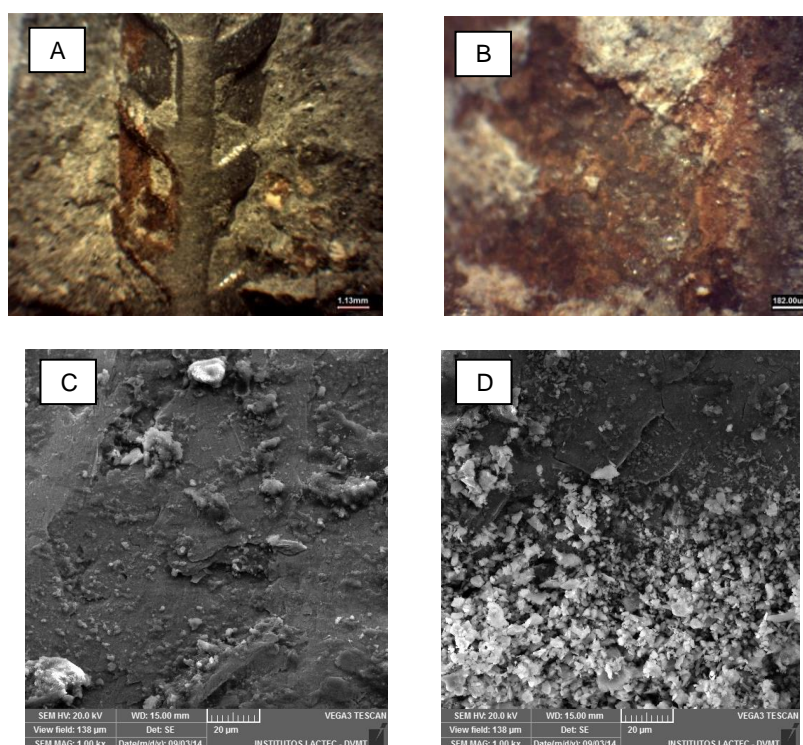


FIGURA 78 –MICROGRAFIAS DA BARRA METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 DURANTE 680 DIAS: (A) COM AUMENTO DE 14X; (B) DETALHE DA IMAGEM A EM 90X; (C) ÓXIDOS DE FERRO (MAGNETITA) COMO PRODUTOS DE CORROSÃO; (D) PASTA CIMENTÍCIA ADERIDA À CAMADA DE ÓXIDOS DA BARRA METÁLICA

Na FIGURA 79 estão apresentadas imagens das barras metálicas retiradas dos diferentes concretos estudados, com envelhecimento em dessecador.

A forma de corrosão identificada foi a localizada com coloração marrom alaranjada, para todos os materiais, exceto para o de CC, que apresentou corrosão generalizada. Essa corrosão foi localizada em regiões angulosas, como nas emendas e/ou nervuras do aço, que é a região de maior tensão superficial.

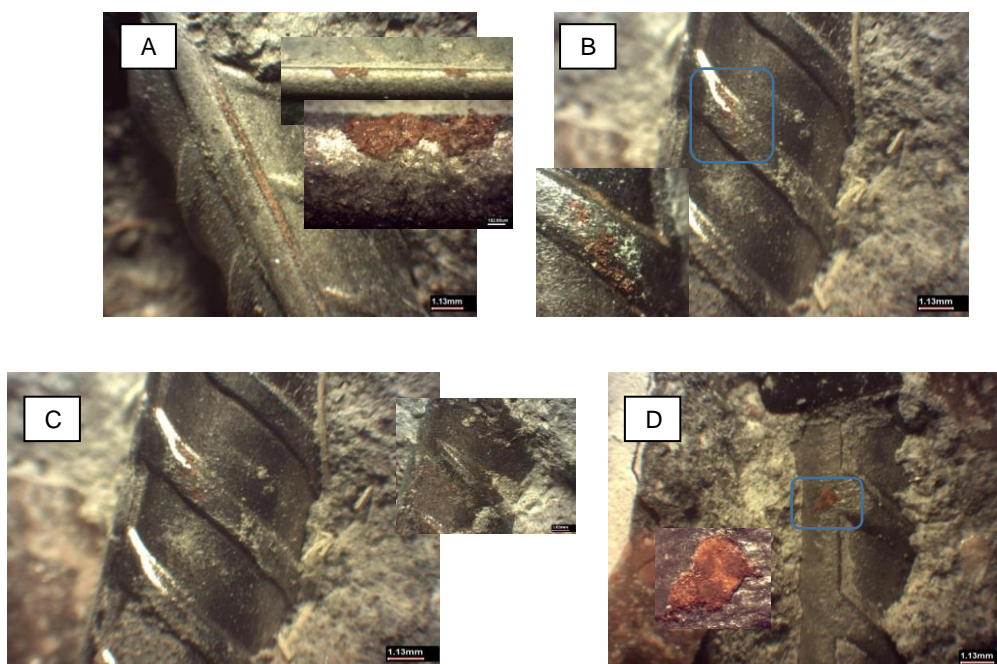


FIGURA 79 – MICROGRAFIAS DAS BARRAS METÁLICAS RETIRADAS DE CP DE CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR: (A) DO CONCRETO COM FC; (B) DO CONCRETO COM FS; (C) DO CONCRETO COM CC; (D) DO CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA

A microestrutura obtida para os produtos de corrosão com envelhecimento em dessecador foi somente a fase magnetita, conforme exemplo da FIGURA 80. Nesta imagem também é perceptível uma quantidade de matriz cimentícia aderida à barra metálica.

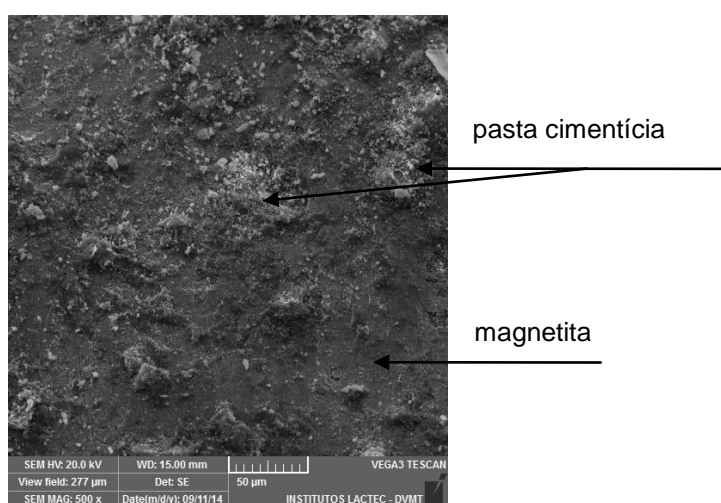


FIGURA 80 – MICROGRAFIA DA BARRAS METÁLICA RETIRADA DE CP DE CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR CONTENDO A FASE MAGNETITA E UMA CERTA PORÇÃO DE PASTA CIMENTÍCIA ADERIDA

Assim, pode-se afirmar que, a estrutura de um aço dentro do concreto em ambiente agressivo rico em cloreto compreende uma camada interfacial dupla, formada por uma camada interna de magnetita (Fe_3O_4) e outra externa formada por uma mistura de goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$) e lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$). Para o ambiente industrial simulado com SO_2 foi constatado a predominância da fase de óxidos magnetita na estrutura do aço. No entanto, os concretos produzidos com CC e FC também apresentaram as fases goetita e lepidocrocita, ocasionada pela presença de Cl^- , característica destes insumos.

Microestrutura do concreto.

Na FIGURA 81 está apresentada a micrografia do concreto REF em câmara de névoa salina, e o seu perfil do elemento cloro. É possível afirmar que este se difundiu pela profundidade do concreto, até 240 μm , sem atingir efetivamente a armadura.

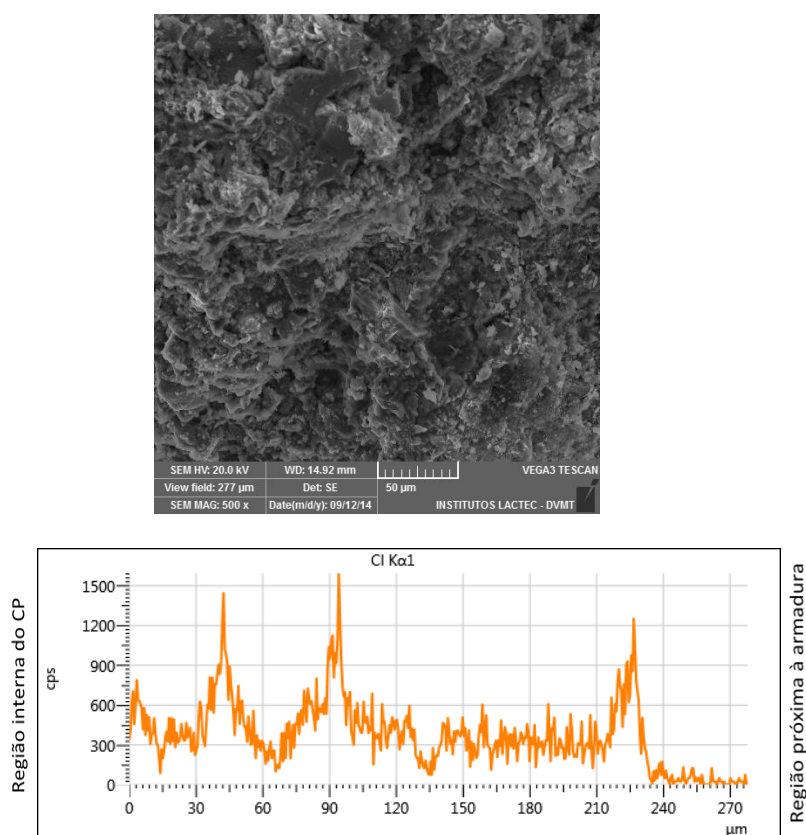
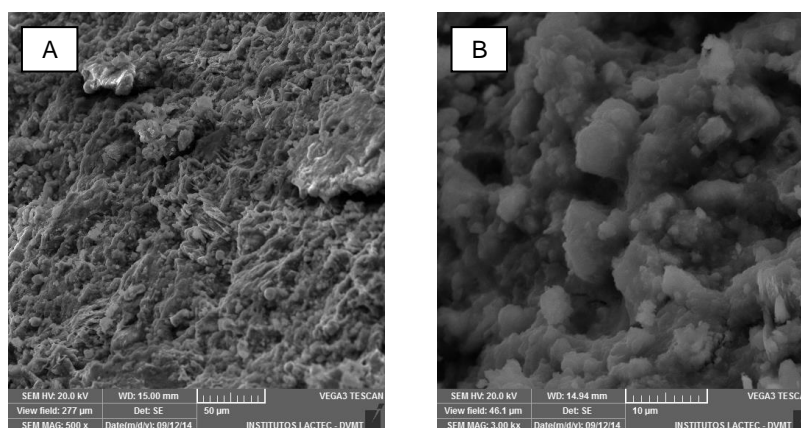


FIGURA 81 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 560 DIAS; E ESPECTRO DE EDS DO ELEMENTO QUÍMICO CL OBTIDO AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO

Os espectros de EDS obtidos para os elementos químicos individualmente, e que estão apresentados neste trabalho, foram respostas obtidas em um perfil ao longo da amostra de concreto, e perpendicular à barra de aço.

As micrografias da FIGURA 82 foram obtidas do concreto REF com envelhecimento em câmara de SO₂ durante 560 dias. Foi possível verificar por EDS, entre outros elementos, a presença de S (enxofre), Fe (ferro) e C (carbono). Os perfis destes elementos, obtidos a partir de uma linha de corte no concreto e perpendicular à barra de aço, indicaram a presença de S ao longo do concreto, alcançando também a armadura (barra de aço); o Fe na região próxima à armadura, indicando que os óxidos da barra penetraram no concreto; e o C devido à carbonatação, já que está presente na região superficial do concreto.



C	Elemento químico	Ca	O	Si	Mg	Al	K	Fe	S	Na
	Teor em massa (%)	45,9	34,9	7,7	4,6	2,8	1,5	1,2	1,0	0,4

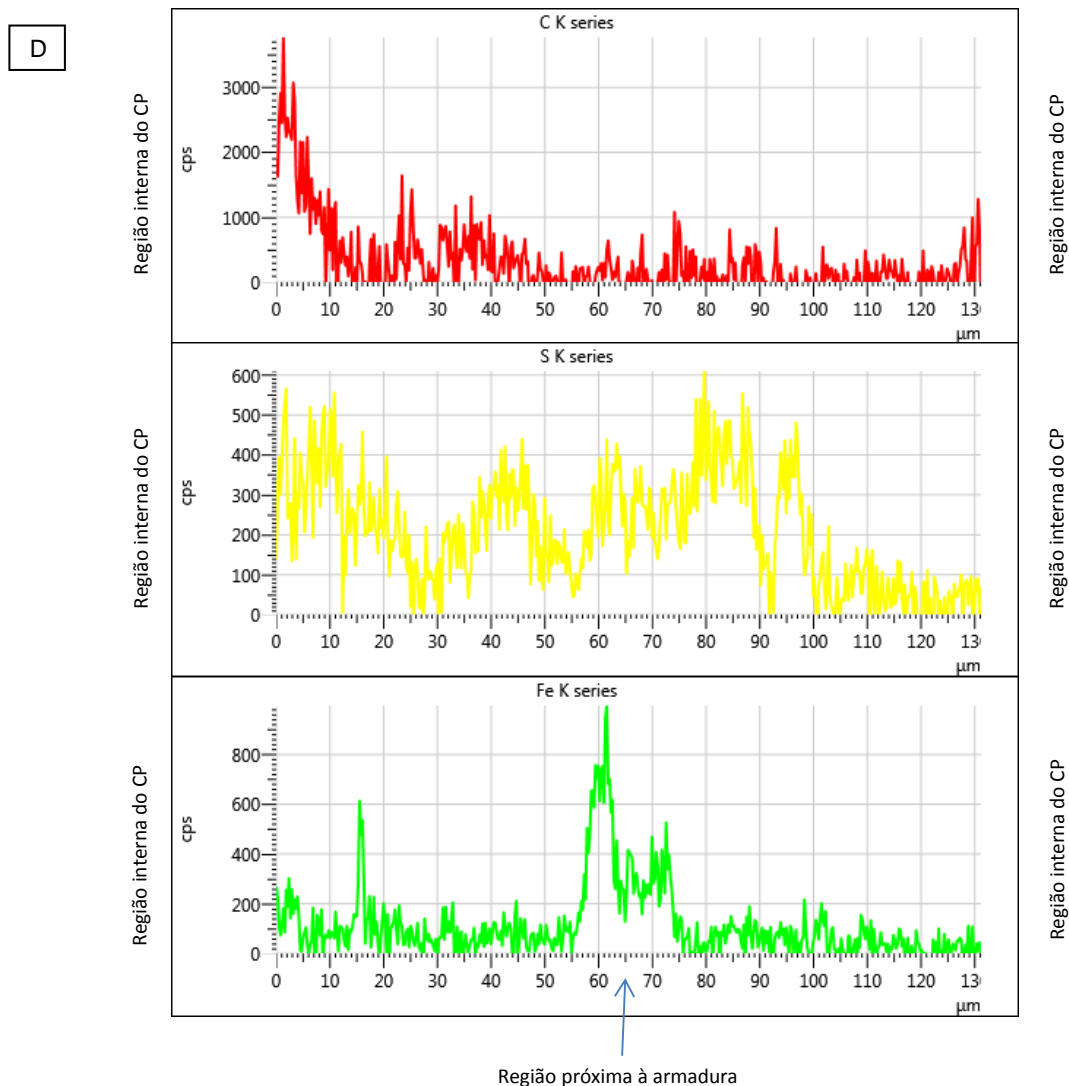
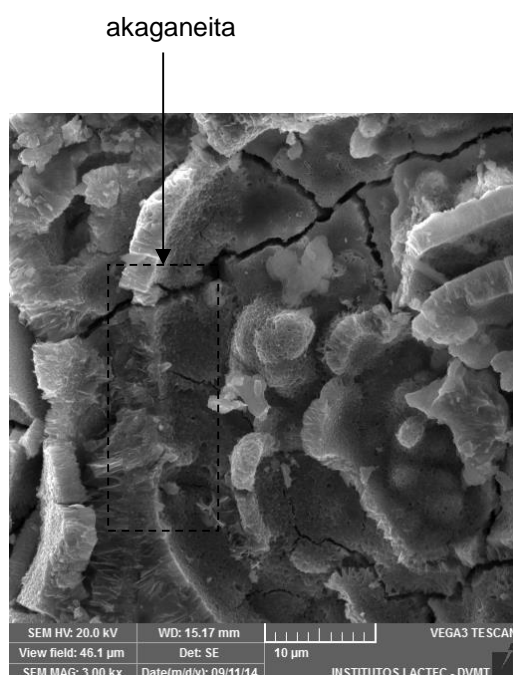


FIGURA 82 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REF ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 POR 560 DIAS: (A) AMPLIAÇÃO DE 500X; (B) AMPLIAÇÃO DE 3000X, MOSTRANDO OS CRISTAIS A BASE DE S; (C) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS IDENTIFICADOS POR EDS DA IMAGEM (A); (D) ESPECTROS DE EDS DOS ELEMENTOS QUÍMICOS C, S E Fe OBTIDOS AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO

O concreto reforçado com FC, após o envelhecimento em câmara de névoa salina durante 670 dias e fratura do CP, apresentou camada de óxidos de ferro aderida à pasta cimentícia que estava em contato com a barra metálica, conforme espectro e micrografia da FIGURA 83.

Isto, geralmente ocorre após a formação de produtos de corrosão na superfície da barra metálica, os quais difundem-se pelos espaços vazios para preencher na interface metal/pasta cimentícia. Como grande parte dos produtos de corrosão (goetita, lepidocrocita e akaganeita) são expansivos, estes se depositam na

camada cimentícia, causando micro-fissuras. Na respectiva imagem é possível identificar também a fase akaganeita (FIGURA 83), que é típica de ambiente rico em cloreto (Koleva *et al.*, 2008). A presença desta fase, assim como o percentual de cloreto no concreto (1,7%, obtido por EDS da FIGURA 83) permitiu concluir que este material com adição de FC apresentou elevada salinidade, ou seja, maior absorção do sal durante o envelhecimento acelerado na câmara de névoa salina.



Elemento químico	Fe	O	Ca	Na	Cl	K	Si	Mn	S
Teor em massa (%)	62,1	23,5	6,1	3,7	1,7	1,1	1,1	0,4	0,3

FIGURA 83 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FC, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS; E OS TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS OBTIDOS POR EDS CORRESPONDENTE À IMAGEM

Na FIGURA 84 está apresentada a microestrutura do concreto com FC, e os espectros dos elementos Cl e Fe, comprovando a presença desses ao longo do concreto, com maior concentração de Fe na região que estava a barra metálica.

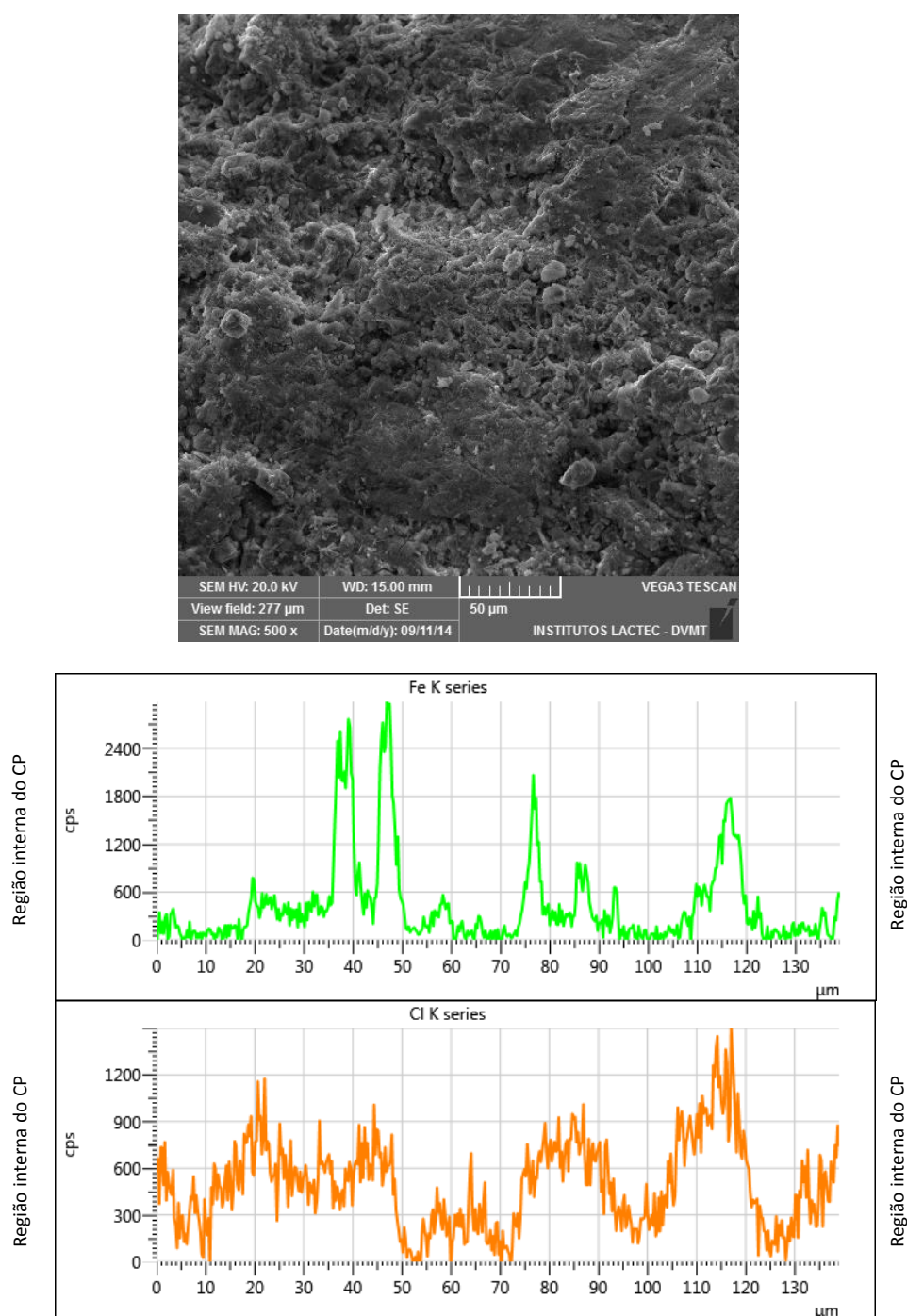


FIGURA 84 –MICROGRAFIA DO CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FC, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS; E ESPECTRO DE EDS DOS ELEMENTOS Cl E Fe, OBTIDOS AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO

Na FIGURA 85 consta a microestrutura do concreto produzido com FS e envelhecido em câmara de SO_2 durante 720 dias. Foi identificado concentração de S na porcentagem máxima de 3,2%, com variações ao longo do perfil. Segundo o

espectro de EDS do Fe, seus óxidos se difundiram no concreto, porém apenas em pequena profundidade.

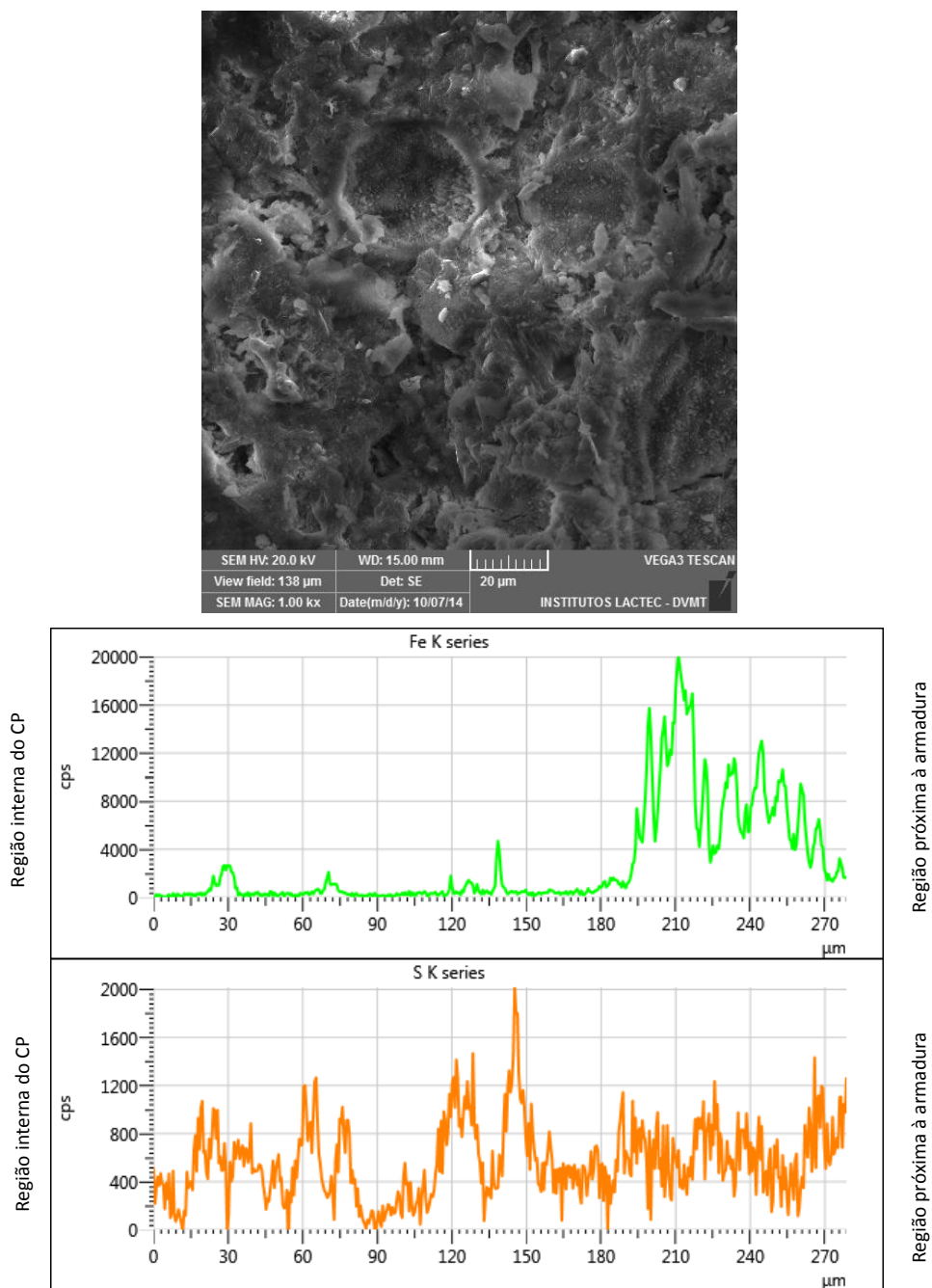


FIGURA 85 – MICROGRAFIA DO CONCRETO REFORÇADO COM 0,8% DE FS, E ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 POR 720 DIAS; E ESPECTROS DE EDS DO ELEMENTO Fe E S, OBTIDO AO LONGO DA AMOSTRA DE CONCRETO, PERPENDICULAR À BARRA DE AÇO

Entre as particularidades das microestruturas obtidas por SEM, o concreto com adição de 5% de CC envelhecido em câmara de SO_2 , apresentou cristais contendo Ca, Al e S, na ordem de maior para menor concentração. Isto identifica o monossulfoaluminato de cálcio hidratado, que provavelmente foi produto da corrosão do concreto pela presença do íon agressivo SO_2 , ilustrado na FIGURA 86.

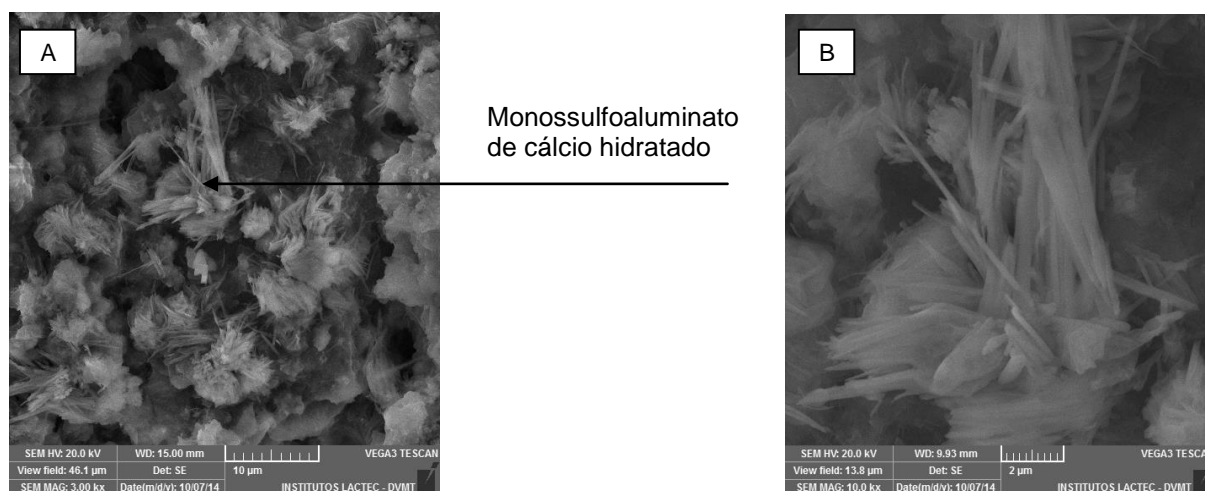


FIGURA 86 – (A) MICROGRAFIA DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE 5% DE CC ENVELHECIDO EM CÂMARA DE SO_2 , APRESENTANDO MONOSSULFOALUMINATO DE CÁLCIO HIDRATADO; (B) DETALHE DA IMAGEM (A)

Mesmo com uma alta concentração de S na câmara do envelhecimento, o concreto com 5% de CC apresentou baixos teores de S^{-2} (inexistente ou até 1,3%, identificado por EDS). Isto se deve à reação química do S com os componentes da mistura, gerando sulfato de cálcio que, então reage com o hidrato aluminato de cálcio e por fim, pode formar a etringita e/ou o monossulfoaluminato de cálcio.

Outra questão observada é que nas dosagens com fibras, foram identificados vazios nas interfaces fibra-matriz cimentícia (FIGURA 87-A), da mesma forma que Agopyan *et al.* (2005), os quais apareceram provavelmente devido à absorção de água pela fibra durante a dosagem e após a sua secagem na cura do concreto. Além disso, também foi verificado cristais de cloreto sobre as fibras (identificado pela técnica de EDS) nos CPs de concreto após envelhecimento em câmara de névoa salina, exemplificado na FIGURA 87-B.

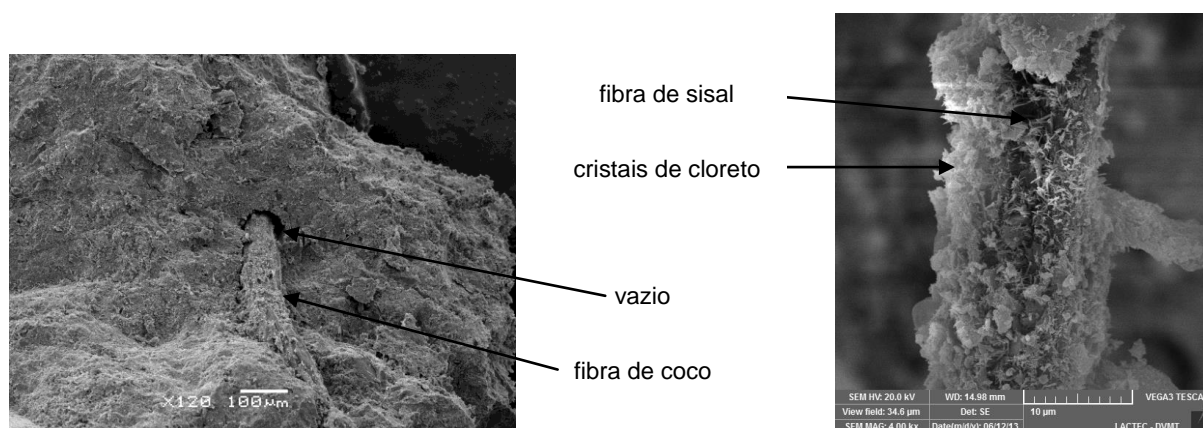


FIGURA 87 – MICROGRAFIAS DOS CPS DE CONCRETO ENVELHECIDOS EM NÉVOA SALINA (A) COM FC, APRESENTANDO VAZIOS; (B) FS COM CRISTAIS DE CLORETO

As micrografias apresentadas inferem que o aumento do tempo de exposição das amostras a estas atmosferas (marinha e industrial) acarretarão em expansões internas com a possibilidade da geração de trincas e de um processo progressivo de corrosão da armadura. Ressalta-se que o ambiente de análise é muito mais agressivo (mais de 100 vezes) do que o natural, mesmo estando muito próximos das fontes geradoras (BRAMBILLA *et al.*, 2011).

4.2.2.4 Perda de espessura da armadura

As microestruturas obtidas para as barras de aço retiradas do concreto REF, após a limpeza em solução de Clark, estão apresentadas na FIGURA 88. Os três diferentes tipos de envelhecimento ocasionaram três diferentes tipos de desgaste ao material inserido no concreto.

Uma corrosão generalizada irregular foi constatada no envelhecimento em câmara de névoa salina, onde se tem a presença de íons Cl^- . A superfície foi caracterizada com cavidades de até 103,62 μm de largura, conforme FIGURA 88 (B) e (E). Não foi possível identificar como pite, já que estas áreas são muito pequenas e de pequena profundidade, enquanto a maioria permanece inalterada. E, neste caso, as cavidades superficiais foram predominantes.

A corrosão da armadura identificada para o concreto REF com envelhecimento em câmara de SO_2 foi localizada, conforme FIGURA 88 (C) e (F); da

mesma forma que a corrosão do concreto REF armado no dessecador (FIGURA 88-A e D).

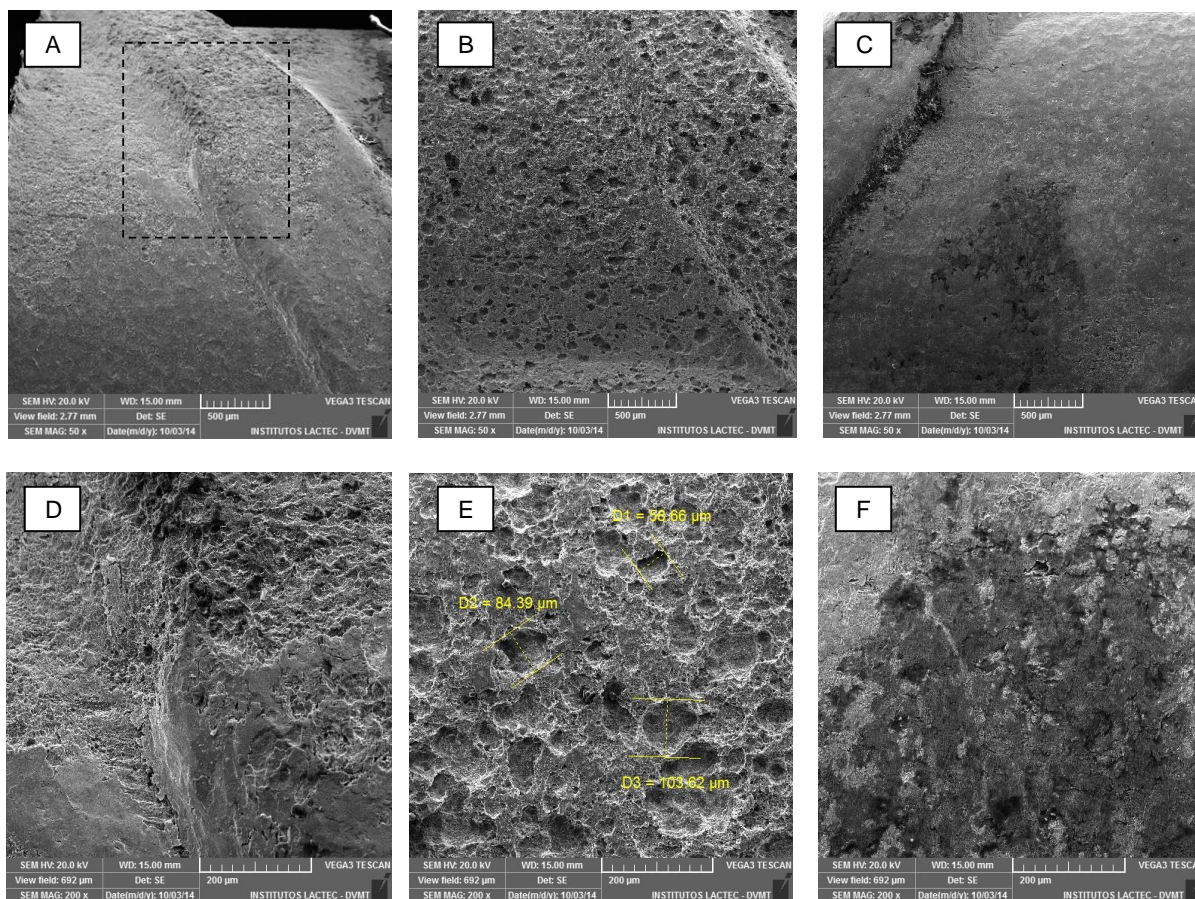


FIGURA 88 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO REF COM ENVELHECIMENTO POR 560 DIAS: (A) EM DESSECADOR, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (C) EM CÂMARA DE SO₂, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (D) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (E) DETALHE DA IMAGEM (B) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (F) DETALHE DA IMAGEM (C) COM AMPLIAÇÃO DE 200X

As micrografias da FIGURA 89, da armadura do concreto REF em câmara de névoa salina, apresentaram cristais com composição química elementar de O, C, Fe e Cl, conforme espectro de EDS. É possível que parte do elemento Fe esteja sendo detectado da barra de aço.

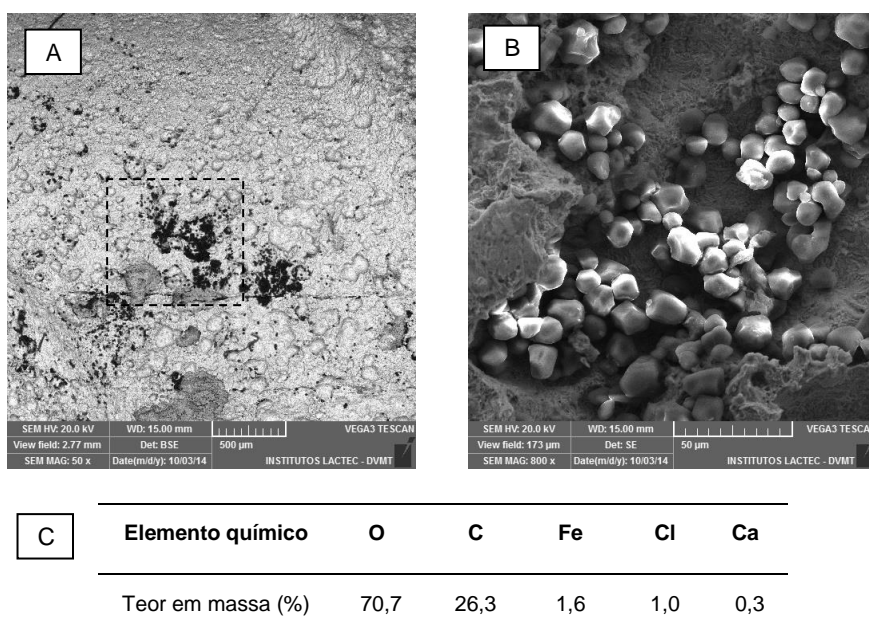


FIGURA 89 – (A) MICROGRAFIA, APÓS LIMPEZA, DA BARRA DE AÇO RETIRADA DO CONCRETO REF COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 560 DIAS; (B) MICROGRAFIA DO DETALHE DA IMAGEM (A); (C) OS TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS DOS CRISTAIS DA IMAGEM (B) OBTIDOS POR EDS

Nas micrografias da FIGURA 90 estão apresentados os desgastes dos concretos reforçados com FC após 670 dias, em ambiente de dessecador (A e B) e névoa salina (C e D). O primeiro indica corrosão localizada, enquanto o segundo, corrosão generalizada irregular.

As dimensões das cavidades verificadas neste aço (do concreto com 0,8% FC) foram inferiores, e da ordem de 55,42 μm , daquelas obtidas das barras de aço do concreto REF, ambas com envelhecimento em câmara de névoa salina. Isto pode indicar que o concreto produzido com FC obteve um melhor desempenho quanto aos íons de Cl^- , mesmo com um tempo de envelhecimento maior (REF, 560 dias; com FC, 670 dias).

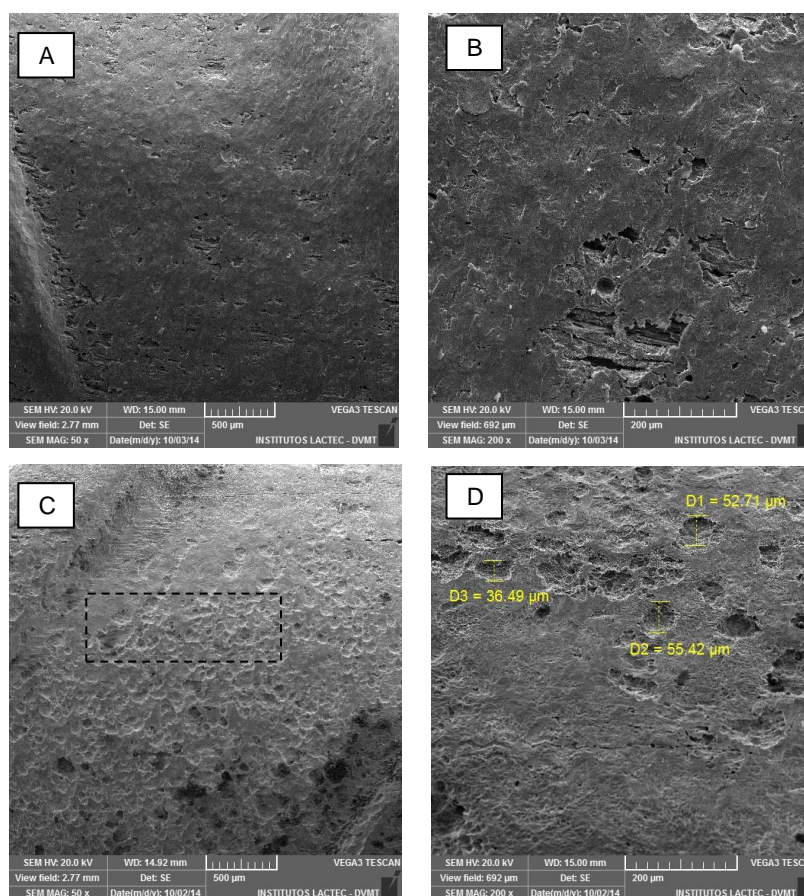


FIGURA 90 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM 0,8% FC: (A) COM ENVELHECIMENTO EM DESSECADOR POR 670 DIAS, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (C) COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (D) DETALHE DA IMAGEM (C) COM AMPLIAÇÃO DE 200X

Também foram identificados cristais com composição química similar ao anterior de C, O, Fe e Cl na barra metálica inserida no concreto com 0,8% de FC, no envelhecimento em câmara de névoa salina durante 670 dias, conforme micrografia e espectros da FIGURA 91. O espectro da região 2 (barra de aço) foi feito comparativamente à região 1, àquela com a presença de cristais.

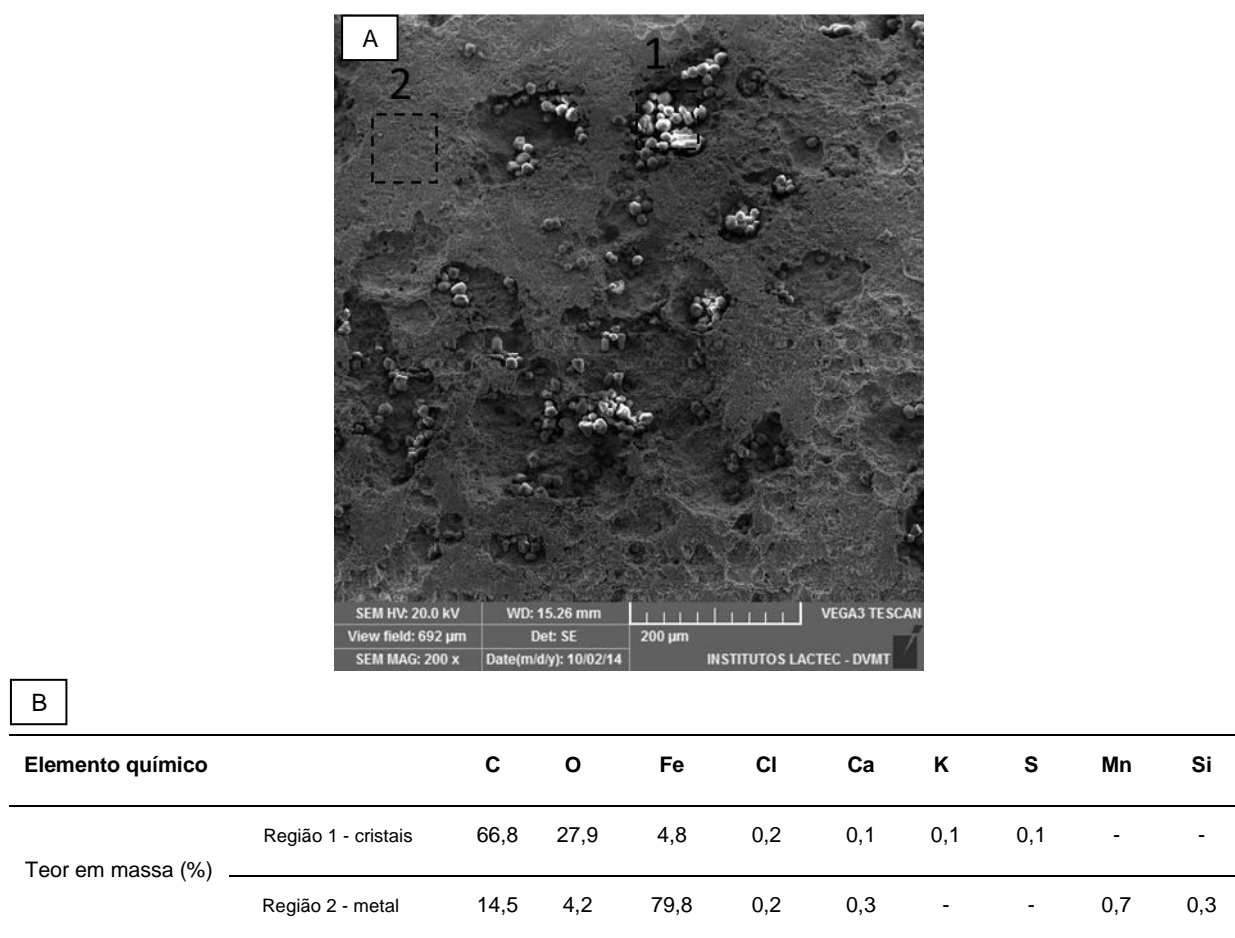


FIGURA 91 – (A) MICROGRAFIA, APÓS LIMPEZA, DA BARRA DE AÇO RETIRADA DO CONCRETO COM 0,8% DE FC COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS; (B) TEORES DOS ELEMENTOS QUÍMICOS CORRESPONDENTE À IMAGEM: REGIÃO 1 (CRISTAIS) E REGIÃO 2 (METAL), OBTIDOS POR EDS

As micrografias da FIGURA 92, de barras de aço retiradas do concreto com 0,8% de FS, obtidas após limpeza, quando comparadas às barras dos concretos REF e com 0,8% FC, com envelhecimento em câmara de névoa salina, apresentaram cavidades maiores, no entanto, em menor quantidade, como às do concreto com 0,8% FC. Isto indicou uma corrosão localizada, já identificada na FIGURA 68 (A) e na FIGURA 68 (B).

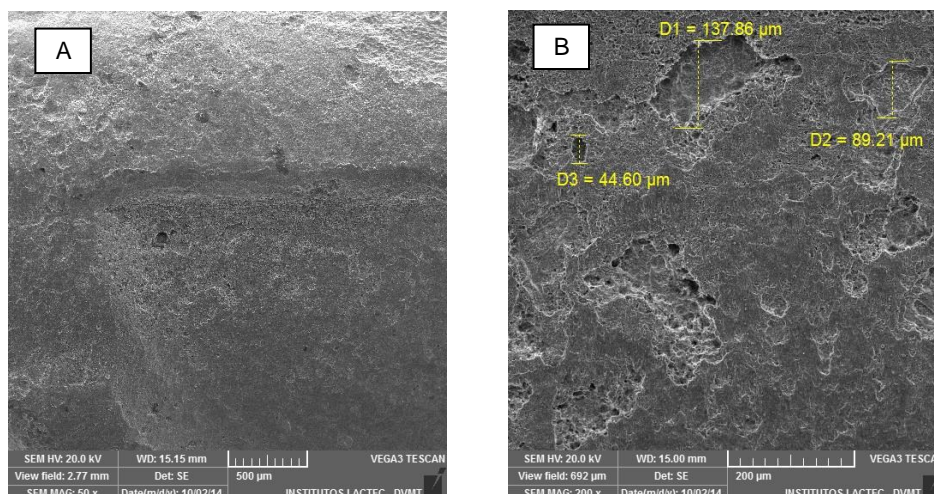


FIGURA 92 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM 0,8% FS: (A) COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 670 DIAS, COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X

Na FIGURA 93, estão apresentadas as micrografias de barras de aço retiradas de concreto com pintura fotocatalítica e envelhecidas em câmara de névoa salina, após limpeza. Estas são características de corrosão generalizada irregular.

A FIGURA 94 associada com a FIGURA 62 (B) indica corrosão generalizada irregular, com cavidades variando na largura entre 37,19 e 193,90 µm, para o concreto armado com adição de 5% de CC com envelhecimento em câmara de névoa salina.

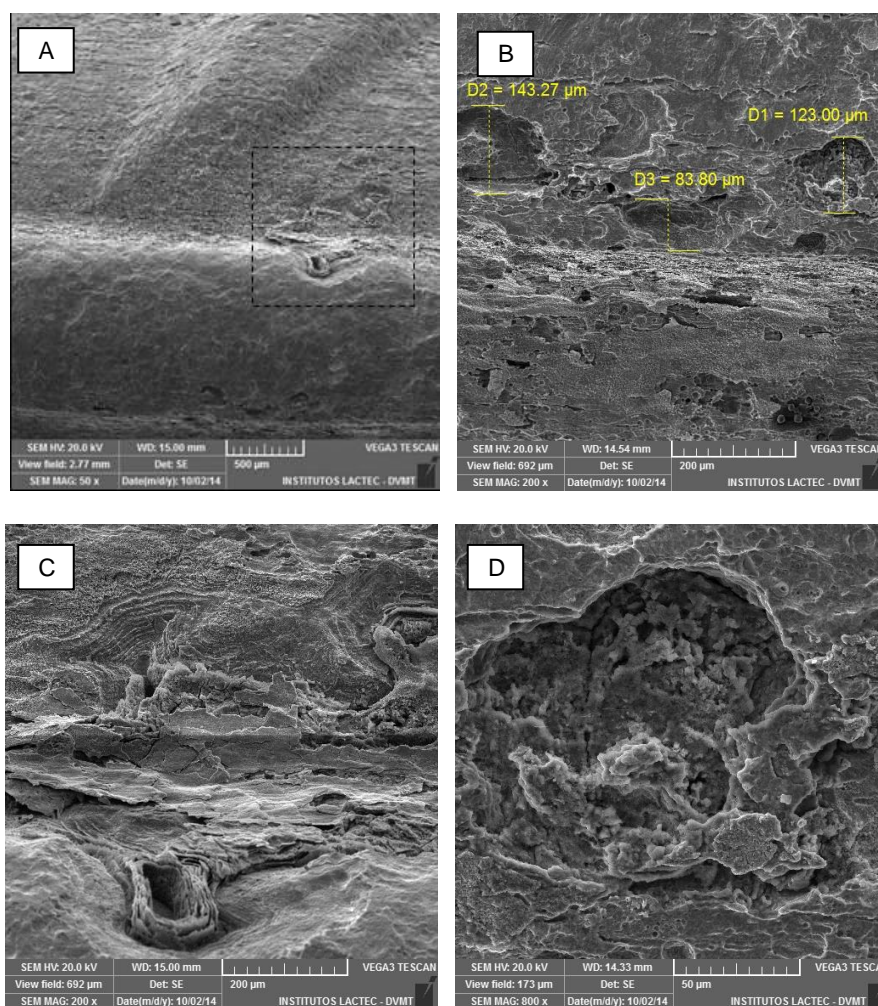


FIGURA 93 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 680 DIAS: (A), COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (C) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 200X; (D) DETALHE DA IMAGEM (B) COM AMPLIAÇÃO DE 800X

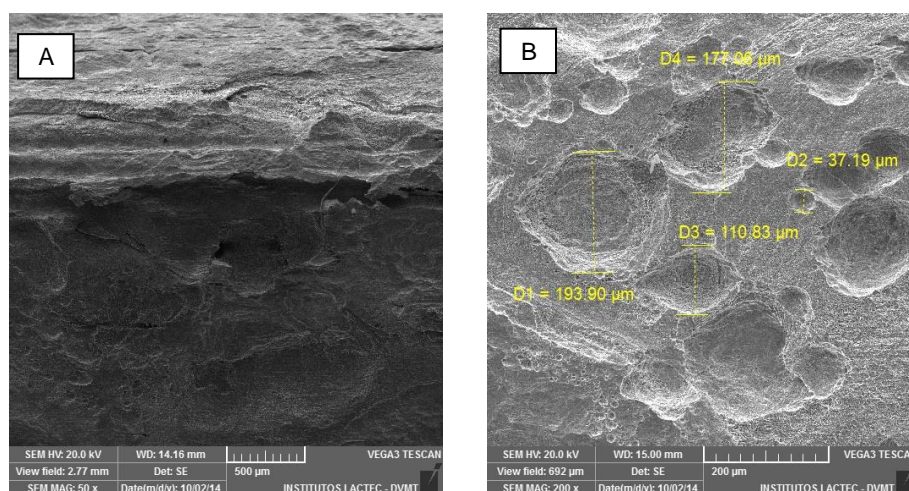


FIGURA 94 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM CC, COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE NÉVOA SALINA POR 650 DIAS: (A), COM AMPLIAÇÃO DE 50X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 200X

O aspecto de desgaste para as barras metálicas retiradas dos concretos produzidos com FC e CC com envelhecimento em câmara de SO_2 é o mesmo; ou seja, são identificadas cavidades, como para os concretos com envelhecimento em câmara de névoa salina, conforme micrografias da FIGURA 95. As dimensões de largura identificadas para o concreto armado com CC foram bem superiores ao da FC, em torno de 3x.

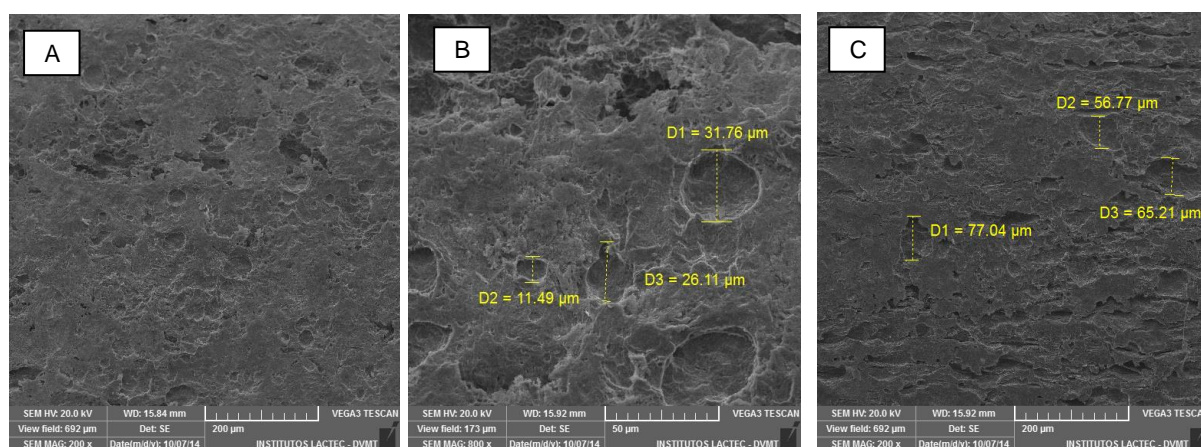


FIGURA 95 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2 : (A) POR 670 DIAS, CONCRETO COM FC, AMPLIAÇÃO DE 200X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A) COM AMPLIAÇÃO DE 800X; (C) POR 650 DIAS, CONCRETO COM CC, AMPLIAÇÃO DE 200X

Na FIGURA 96 estão apresentadas as micrografias obtidas para as barras metálicas retiradas dos concretos com FS e com cobertura fotocatalítica, e que tiveram envelhecimento em câmara de SO_2 durante 720 e 680 dias, respectivamente. O aspecto é de desgaste superficial, aparentemente em camadas.

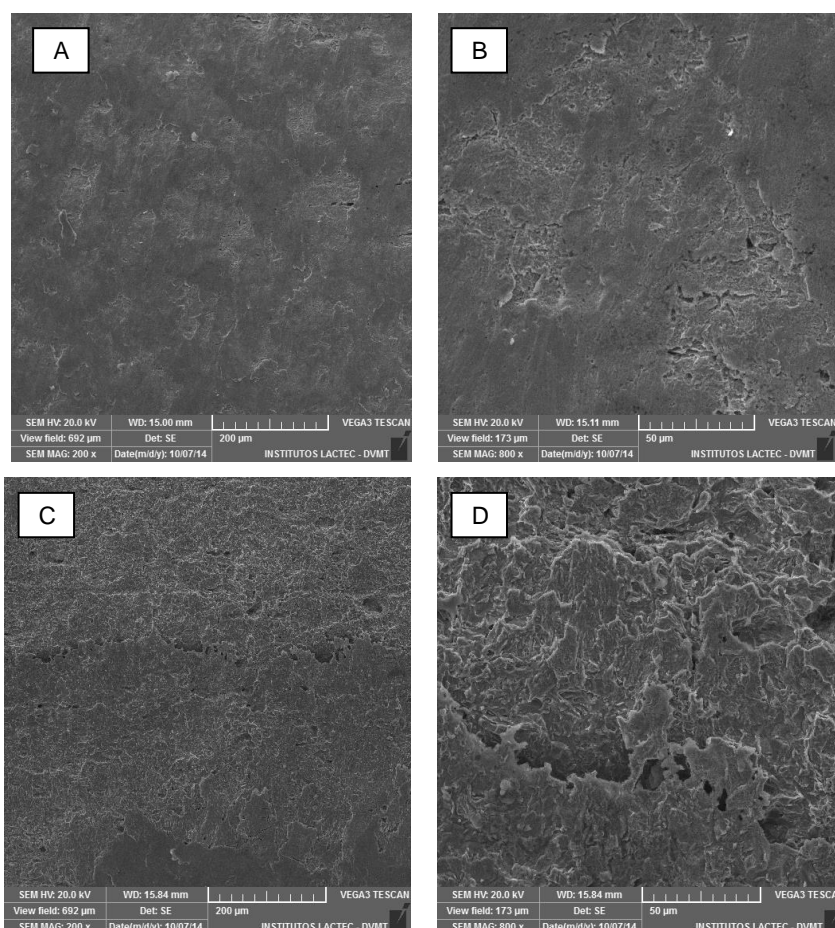


FIGURA 96 – MICROGRAFIAS, APÓS LIMPEZA, DAS BARRAS DE AÇO RETIRADAS DO CONCRETO COM ENVELHECIMENTO EM CÂMARA DE SO_2 : (A) CONCRETO COM FS, AMPLIAÇÃO DE 200X; (B) DETALHE DA IMAGEM (A); (C) CONCRETO COM PINTURA FOTOCATALÍTICA, AMPLIAÇÃO DE 200X

Em relação aos valores obtidos de perda de espessura da armadura após envelhecimento e limpeza, foi de no máximo 5%, não sendo possível identificar o tipo de dosagem de concreto armado que teve maior degradação. O período de tempo de exposição das amostras nos ambientes agressivos não foi suficiente para evidenciar a perda de espessura devido à corrosão das barras metálicas.

4.2.2.5 Caracterização das fibras internas do concreto

Na FIGURA 97 e FIGURA 98, estão apresentadas as curvas TG das FS e FC, sendo natural, antes da sua aplicação no concreto, e as outras duas retiradas internamente dos mesmos armazenados em dessecador e em câmara de névoa salina por 600 dias.

Para todas as fibras, abaixo de 100 °C, a perda de massa foi atribuída à umidade das mesmas, especialmente pelo caráter hidrofílico; até, aproximadamente 400 °C, ocorreu a decomposição da hemicelulose; e nas temperaturas superiores a 400 °C, a degradação dos constituintes lignina e celulose das fibras. As fibras oriundas dos concretos apresentaram um comportamento não idêntico, porém similar às fibras naturais, o quê sugere a absorção de produtos hidratados cimentícios pelas fibras, e não a degradação das mesmas.

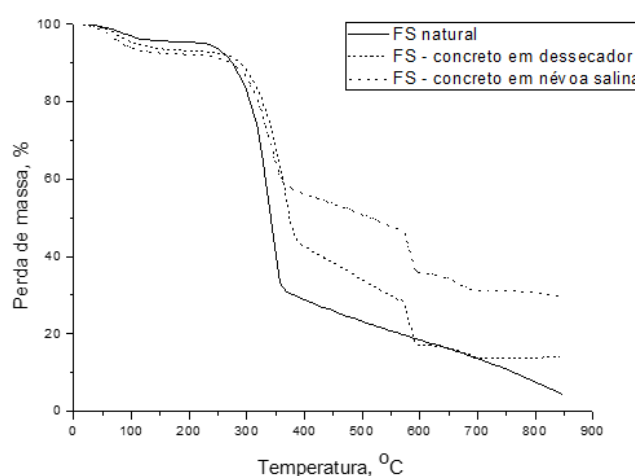


FIGURA 97 - TERMOGRAVIMETRIA DA FS: NATURAL, E DOSADAS EM CONCRETO ARMAZENADO EM DESSECADOR E CÂMARA DE NÉVOA SALINA, CARACTERIZADA EM ATMOSFERA OXIDANTE ATÉ 550 °C E INERTE DESTA ATÉ 850 °C

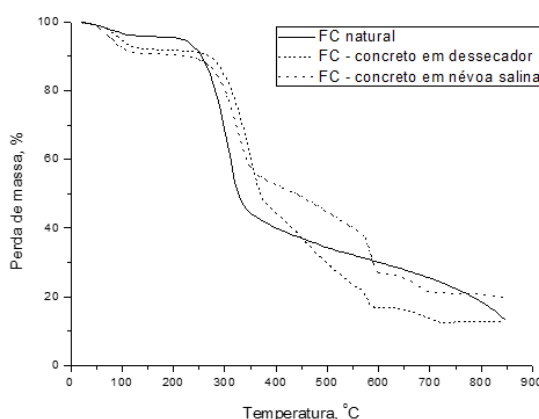


FIGURA 98 - TERMOGRAVIMETRIA DA FC: NATURAL, E DOSADAS EM CONCRETO ARMAZENADO EM DESSECADOR E CÂMARA DE NÉVOA SALINA, CARACTERIZADA EM ATMOSFERA OXIDANTE ATÉ 550 °C E INERTE DESTA ATÉ 850 °C

Na FIGURA 99 a FIGURA 102, estão apresentadas as micrografias de FC e FS retiradas de CPs de concreto envelhecidos em dessecador por 600 dias, e na forma natural, antes de ser utilizada na dosagem de concreto.

As imagens de FC apresentadas na FIGURA 99 corroboram com o estudo de John *et al.* (2005). A análise morfológica das FC não apresentou diferença após 600 dias de sua inserção no concreto. A análise química elementar por EDS demonstrou a presença de componentes da pasta de cimento: 2,2% de Ca, 0,5% de Si, 0,3% de Al, 0,2% de Mg, entre outros de menor proporção Estes podem ter migrado ao interior da fibra durante o processo de moldagem.

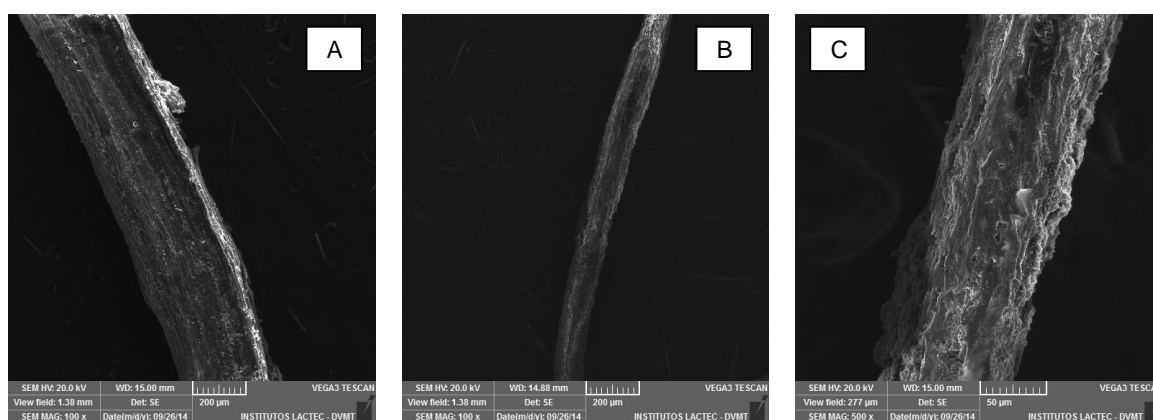


FIGURA 99 - MICROGRAFIAS DE FC: (A) NATURAL; RETIRADA DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X

Nas micrografias da FIGURA 100 é possível identificar uma morfologia diferente para a FC tratada retirada de CP de concreto e com envelhecimento em dessecador por mais de 600 dias. Comparando com a FC sem tratamento, a com tratamento de NaOH não apresentou diferença significativa quanto à composição; e também foi identificado por EDS os componentes da pasta de cimento. Ou seja, além do C e O, 2,9% de Ca, 0,5% de Si, 0,3% de K, 0,2% de Al, 0,2% de Na, entre outros de menor proporção.

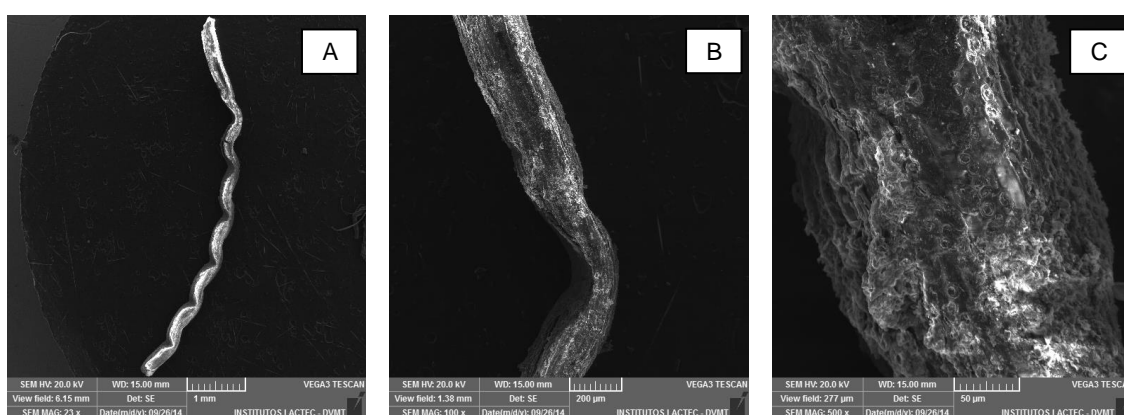


FIGURA 100 -MICROGRAFIAS DE FC TRATADAS RETIRADAS DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X

Em relação às fibras de sisal, é possível perceber uma alteração na morfologia das mesmas após o envelhecimento em dessecador, tanto para as tratadas como para as não. Tanto na FIGURA 101 como na FIGURA 102, fica claro a redução de diâmetro das fibras em certas regiões ao longo da mesma; assim como a presença de poros mais acentuados.

Estas caracterizações das fibras aos 600 dias não sugerem a perda de elasticidade das mesmas, nem mesmo a transformação em um mineral.

Segundo John *et al.* (2005), a degradação das fibras está diretamente relacionado à redução do conteúdo de lignina.

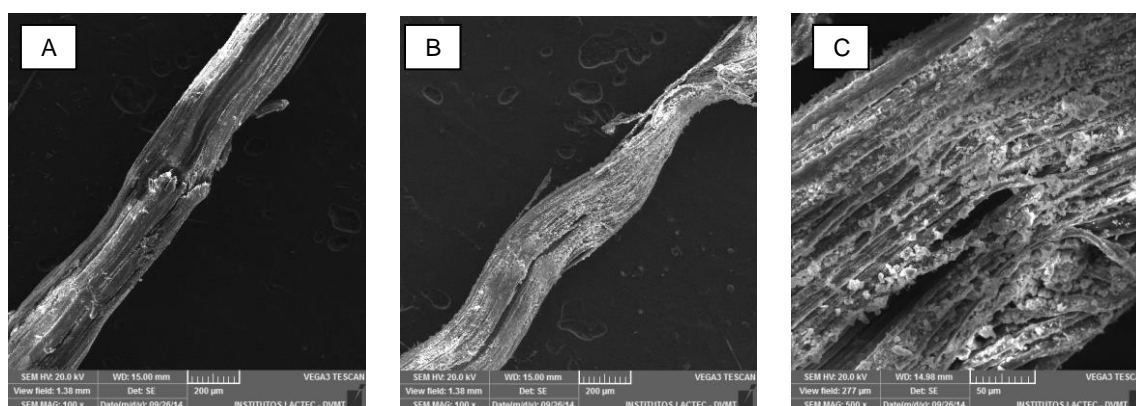


FIGURA 101 -MICROGRAFIAS DE FS: (A) NATURAL; E RETIRADA DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (B) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (C) COM AMPLIAÇÃO DE 500X

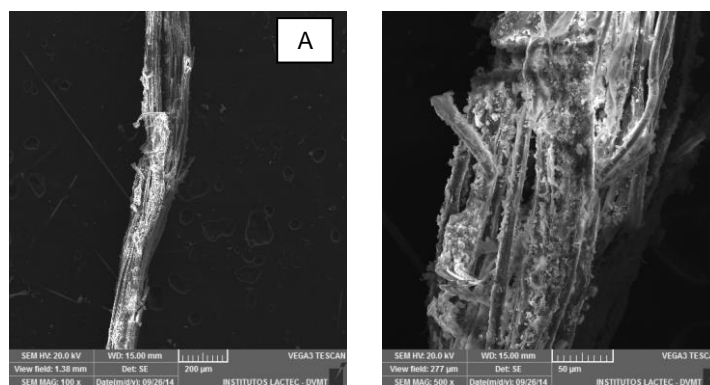


FIGURA 102 -MICROGRAFIAS DE FS TRATADA RETIRADA DE CP DE CONCRETO ENVELHECIDO EM DESSECADOR POR MAIS DE 600 DIAS: (A) COM AMPLIAÇÃO DE 100X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 500X

4.2.3 Estudo Fotocatalítico

4.2.3.1 Determinação do potencial fotocatalítico do TiO_2 para oxidação do NO_x

O gráfico da FIGURA 103 é o resultado obtido para o teste fotocatalítico com radiação UV-A da argamassa produzida com adição de 90% de TiO_2 . A radiação UV-A ligada possibilitou a oxidação imediata do poluente NO_x ; e da mesma forma, quando desligada, as reações fotocatalíticas começaram a cessar, verificando-se a manutenção da concentração do NO_x para valores iniciais de 1,2 ppm.

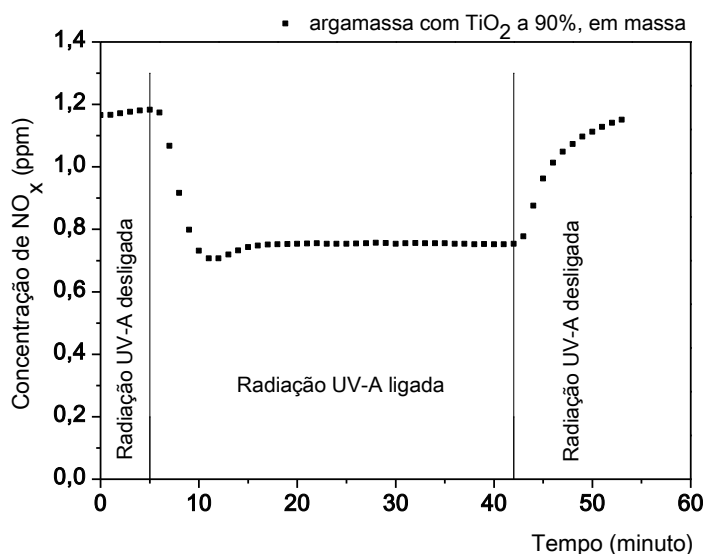


FIGURA 103- TESTE DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE NO_x COM AÇÃO DA RADIAÇÃO UV-A AO LONGO TEMPO, EM ARGAMASSA PRODUZIDA COM 90% DE TiO_2

Na FIGURA 104, estão exemplificados os dados obtidos de oxidação do poluente NO_x em argamassas com diferentes percentagens de TiO_2 . No gráfico (B), as amostras J, produzidas com 5% de TiO_2 , comprovam a reprodutibilidade do sistema, assim como a oxidação fotocatalítica do NO_x de $(30,42 \pm 5,02)\%$. Como comparação, na FIGURA 104(A), estão apresentadas as curvas para as argamassas sem adição de TiO_2 , as quais representam uma oxidação de $(8,58 \pm 2,64)\%$. Os demais dados das argamassas com outras percentagens de TiO_2 não estão apresentados porque tiveram comportamento similar.

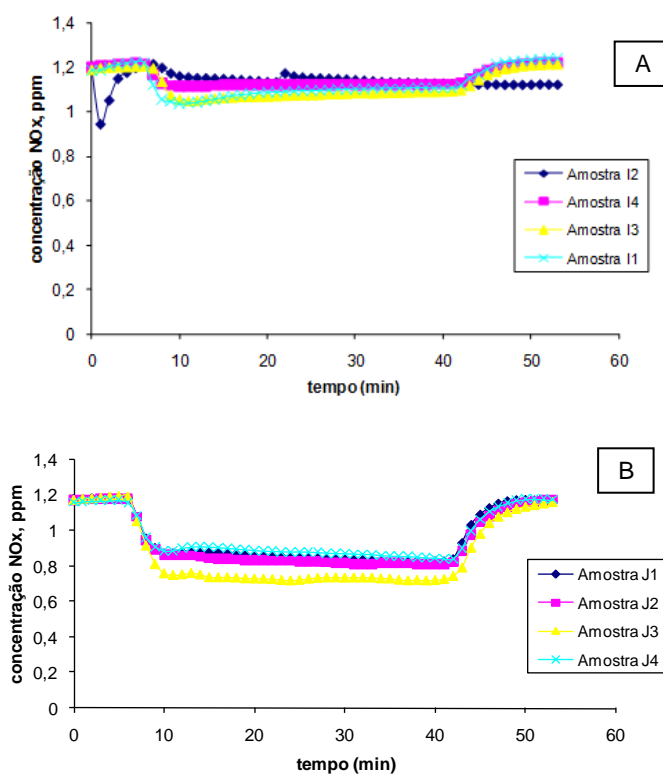


FIGURA 104 -GRÁFICO RESULTANTE DO TESTE DE OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE NO_x , COM RADIAÇÃO UV-A, EM AMOSTRAS: (A) SEM TiO_2 E (B) COM 5% TiO_2 , AOS 28 DIAS DE CURA

Na FIGURA 105, está apresentado o gráfico resumo dos testes de oxidação fotocatalítica do gás NO_x . A taxa de maior oxidação, para as amostras estudadas, esteve centrada entre 30 e 50% de TiO_2 (em peso, e em substituição ao cimento) na argamassa.

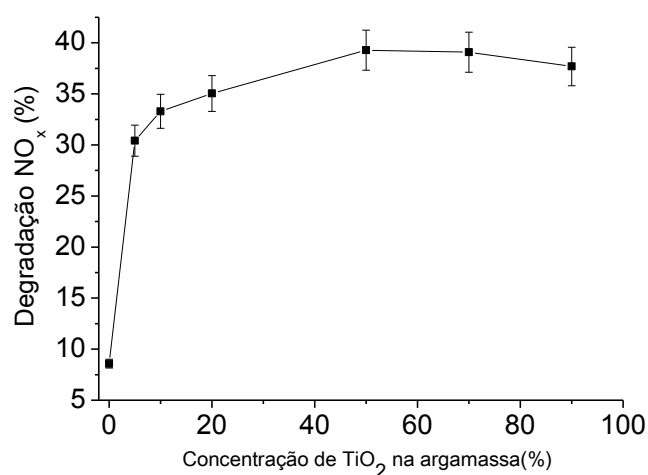


FIGURA 105 - GRÁFICO RESULTANTE DOS VALORES MÉDIOS DOS TESTES DE OXIDAÇÃO DO POLUENTE NO_x , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSAS COM TiO_2

Após 810 dias, novos resultados de oxidação do gás NO_x foram obtidos para as argamassas já testadas aos 28 dias. O resultado do teste fotocatalítico da argamassa com 70% de TiO_2 está representado graficamente na FIGURA 106 e, indicou também a oxidação do poluente NO_x ; além disso, de maior ordem de grandeza, até 26% superior. Este resultado obtido não corrobora com o de Melo *et al.* (2012), já que estes constataram redução da eficiência fotocatalítica em NO_x , em um ano. Porém, naquele estudo, tal perda foi atribuída à sujeira e ao desgaste dos blocos de pavimentação instalados em rua urbana. E aqui, pode estar relacionado ao maior tempo de cura do material.

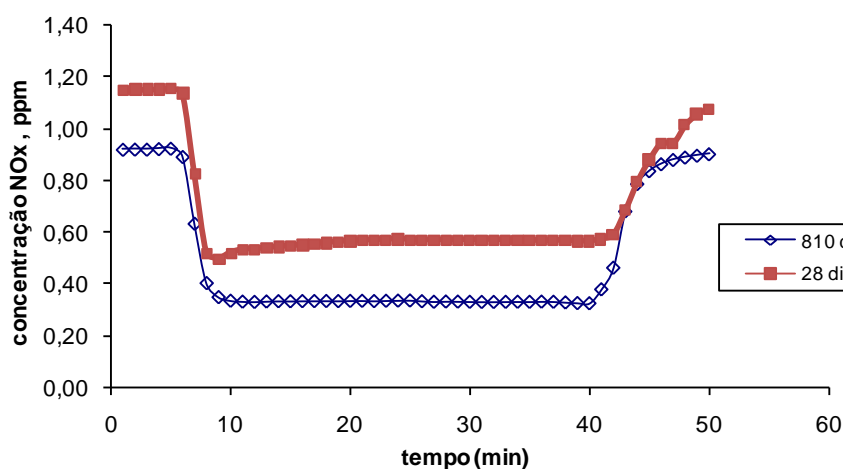


FIGURA 106 -RESULTADOS DOS TESTES DE OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE NO_x , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSA COM 70% DE TiO_2 , AOS 28 E 810 DIAS DE CURA

Na FIGURA 107, estão apresentadas as micrografias das argamassas fotocatalíticas com 50% de TiO_2 obtidas por SEM, na tentativa de identificar os elementos químicos presentes nas reações de fotocatalise. Isto não foi possível, porém, verificou-se um aspecto mais poroso para a argamassa após o teste fotocatalítico com NO_x (FIGURA 107-C e FIGURA 107-D), em comparação a uma estrutura mais compacta e homogênea (FIGURA 107-A e FIGURA 107-B) quando sem o teste.

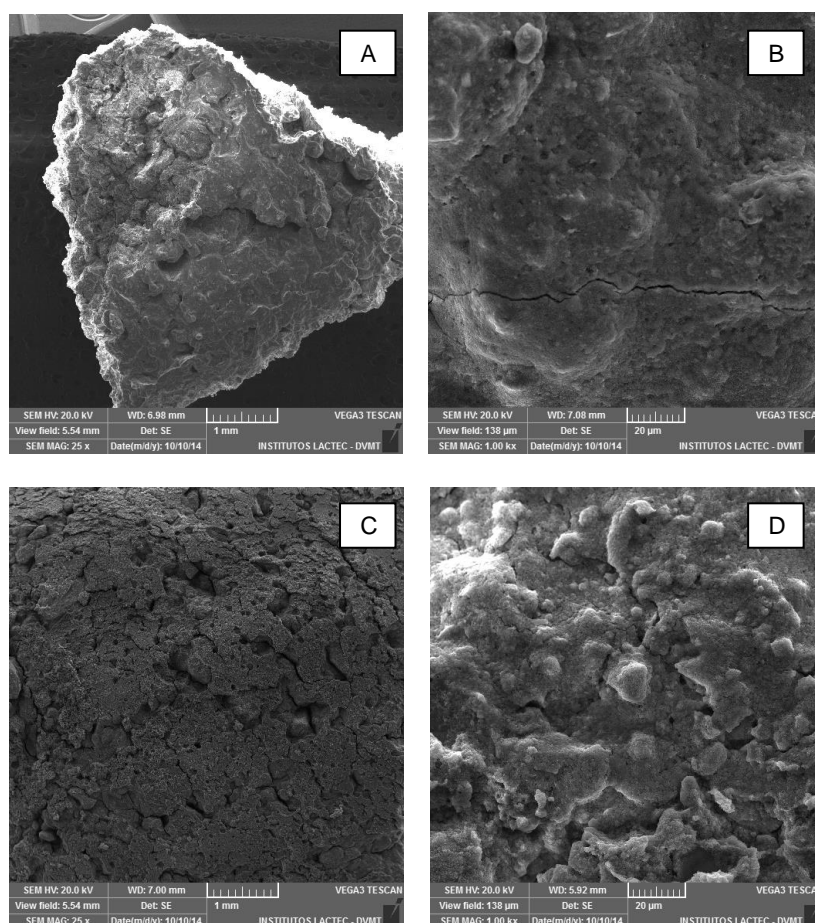


FIGURA 107 – MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DAS ARGAMASSAS FOTOCATALÍTICAS: ANTES DO TESTE FOTOCATALÍTICO (A) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 1000X; APÓS TESTE FOTOCATALÍTICO COM NO_x : (C) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (D) COM AMPLIAÇÃO DE 1000X

4.2.3.2 Determinação do potencial fotocatalítico do TiO_2 para oxidação do SO_2

Os resultados fotocatalíticos obtidos para o gás poluente SO_2 , na concentração de 0,7 ppm, em argamassas contendo TiO_2 estão compilados na FIGURA 108. As argamassas produzidas com TiO_2 na proporção de 5 a 10%, bem como entre 60 e 80%, são àquelas que propiciaram uma maior oxidação do poluente SO_2 .

Como principal resultado de viabilidade técnica e, até, econômica, atribuiu-se que a argamassa contendo 5% de TiO_2 em substituição ao cimento, em massa, foi a mais eficiente.

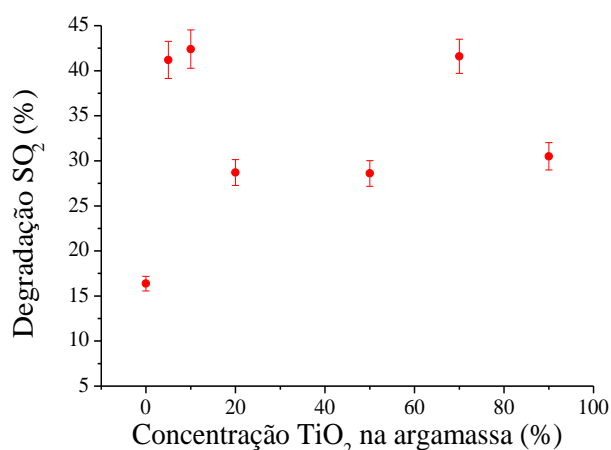
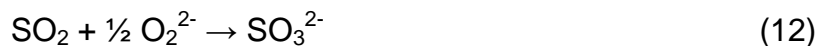


FIGURA 108 - GRÁFICO RESUMO DOS TESTES DE OXIDAÇÃO DO POLUENTE SO_2 , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSAS COM TiO_2

Da mesma forma que para o poluente NO_x , foi verificada a reprodutibilidade e a oxidação nos testes fotocatalíticos com SO_2 . Na literatura, não foi encontrado o mecanismo de oxidação para este gás em peças cimentícias. Porém, por analogia, tem-se a seguinte hipótese, não confirmada.

O SO_2 pode ser oxidado a sulfato ou sulfito, dependendo das condições do ambiente (BALTRUSAITI *et al.*, 2011). De acordo com Chen, Nanayakkara & Grassian (2012), o único produto verificado quando da exposição de partículas de TiO_2 a SO_2 ou SO_2 e O_2 é o sulfito adsorvido.

A adsorção do SO_2 ocorre principalmente pela reação com os radicais hidroxilas e lacunas de O_2 , representada nas Equações 10 a 12.



Na presença de uma fonte de oxigênio como oxigênio molecular ou vapor d'água com radiação UV, o sulfato é o único constatado. A formação deste ocorre a partir de uma lacuna de oxigênio na superfície, de acordo com a Equação 13.



Na FIGURA 109, está apresentado graficamente o desempenho da argamassa com 50% de TiO_2 no teste fotocatalítico com SO_2 aos 28 dias, e após 425 dias. Foi observada a oxidação do poluente SO_2 em 26,5% e 22,4%, respectivamente, para os 28 e 425 dias. Esta redução, superior a 15%, pode ser atribuída às condições de armazenamento das amostras, possibilitando a impregnação de sujeira oriunda de materiais pulverulentos.

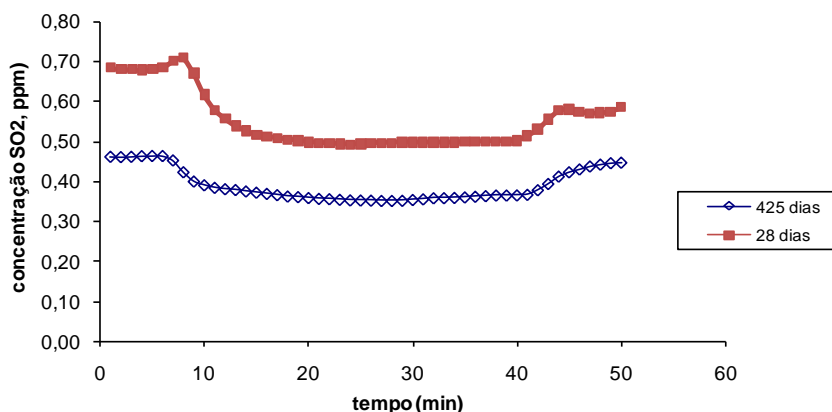


FIGURA 109 - RESULTADOS DOS TESTES DE OXIDAÇÃO FOTOCATALÍTICA DO POLUENTE SO_2 , COM RADIAÇÃO UV-A, EM ARGAMASSA COM 50% DE TiO_2 , AOS 28 E 425 DIAS DE CURA

Assim como para os testes fotocatalíticos de NO_x , as argamassas fotocatalíticas com 50% de TiO_2 apresentaram visualmente, em micrografias de SEM, uma maior porosidade após teste com o gás SO_2 e a radiação UV-A, comparando com a morfologia anterior ao teste. No entanto, esta porosidade é em menor escala que a obtida com o gás NO_x , conforme FIGURA 107-A e B e FIGURA 110.

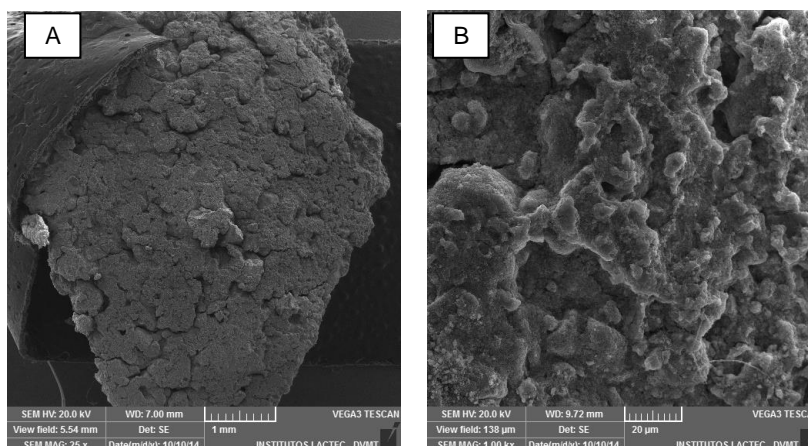


FIGURA 110 –MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MEV DAS ARGAMASSAS FOTOCATALÍTICAS APÓS TESTE FOTOCATALÍTICO COM SO_2 : (A) COM AMPLIAÇÃO DE 25X; (B) COM AMPLIAÇÃO DE 1000X

4.3 ARTEFATOS DE CONCRETO

Após a produção e a análise das diversas dosagens de concreto com adições (FC, FS, CC e TiO_2), os melhores traços, segundo as características de dosagem e de resistência mecânica, foram utilizados para a confecção dos artefatos de concreto, postes e cruzetas em concreto armado, na Fábrica de Postes Barbosa & Barbosa. A imagem da FIGURA 111 ilustra algumas unidades de postes fabricados no processo produtivo.

Na produção dos artefatos, foi observado, assim como no laboratório, a pega mais lenta do concreto com FS; isto se deveu à própria constituição da fibra.



FIGURA 111 - FOTO ILUSTRANDO ALGUMAS UNIDADES DE POSTES FABRICADAS COM AS DOSAGENS INDICADAS

Os resultados obtidos para os CPs produzidos a partir das dosagens dos postes fabricados estão apresentados na TABELA 16.

Os resultados em resistência à compressão dos CPs dos artefatos estão de acordo com o especificado na norma. Os valores obtidos para o coeficiente de absorção dos artefatos estiveram dentro dos limites máximos estabelecidos pela NBR 8451-1 (ABNT, 2011), que é de 5,5% para a média das amostras e 7,0% para o CP.

TABELA 16 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E ABSORÇÃO DOS CPS DE CONCRETO PRODUZIDOS A PARTIR DAS DOSAGENS DOS POSTES FABRICADOS NA BARBOSA & BARBOSA

	Tempo de cura, dias	0,8% FC	0,8% FS	8,5% CC
Resistência à compressão (MPa)	07	30,75 ± 2,02	18,74 ± 1,92	21,53 ± 1,18
	28	42,05 ± 1,84	23,60 ± 1,81	26,32 ± 0,18
	91	46,13 ± 0,24	26,79 ± 0,16	-----
Absorção de água (%)	28	3,06 ± 0,05	4,48 ± 0,25	3,55 ± 0,38

Os resultados obtidos para as cruzetas produzidas com 8,5% CC, 0,8% FC, 0,8% FS e REF estão inseridos na TABELA 17.

Os valores de resistência à compressão para as cruzetas não foram obtidos, já que estes produtos não foram levados à ruptura, tão somente, até a carga nominal. Quanto às flechas obtidas para a FC e FS, foram evidenciadas divergências milimétricas em relação aos valores normatizados. Para a adição de 8,5% CC, os valores máximos (16 mm) foram ultrapassados para ambas as flechas e, também, para os dois lados. As fibras também não apresentaram todos os parâmetros de flecha como conformes à normatização brasileira. Estes valores, porém, encontram-se dentro da faixa do erro, uma vez que a medição em campo apresenta menor rigor e critério, conforme detalhado na FIGURA 112. Porém, estas divergências não tendem a alterar o desempenho dos artefatos, quando em uso.

TABELA 17 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS CRUZETAS FABRICADAS COM CC, FC, FS E REF NA BARBOSA & BARBOSA, BAHIA

Cruzeta	Flecha (mm)				Flecha residual (mm)			
	Esquerda		Direita		Esquerda		Direita	
	mínima	máxima	mínima	máxima	mínima	máxima	mínima	máxima
REF	13	14	12	13	2	3	2	3
8,5% CC	14	18	14	19	2	7	2	5
0,8% FC	12	14	12	12	3	5	4	6
0,8%FS	15	16	15	18	2	3	2	5
NBR 8451	14	16	-	16	-	4	-	4

Os resultados em resistência mecânica dos postes duplo T, de 11 m de comprimento (REF e com as adições de 0,8% FC e 0,8% FS), estão listados na TABELA 18.

TABELA 18 - RESULTADOS OBTIDOS PARA OS TESTES DE RESISTÊNCIA MECÂNICA E ABSORÇÃO DOS POSTES FABRICADOS

Poste	Flecha (mm)	Flecha residual (mm)	Carga de ruptura (daN)	Absorção de água, (%)
REF	315	35	500	2,84 ± 0,37
0,8% FC	320	30	560	3,70 ± 3,65
0,8% FS	331	33	500	4,47 ± 0,09

Na NBR 8451-1 (ABNT, 2011) está estabelecida a flecha permissível para postes como 385 mm, a flecha residual permissível como 38,5 mm e a carga de ruptura mínima como 400 daN. Os valores ficaram abaixo dos limites da norma: até 14,0% para a flecha e 14,3% para a flecha residual. Quanto à carga de ruptura, esta se encontrou acima dos limites, 25% para o poste com 0,8% FS e 40% com 0,8% FC. Comparando com o poste REF, a adição de 0,8% FS alcançou o mesmo valor; já, o poste com 0,8% FC foi 12% superior ao REF% na ruptura.

Quanto à análise de planicidade, defeitos superficiais como trincas, poros, vazios e segregação da argamassa, não foi constatado nenhuma irregularidade, nem mesmo trincas capilares após o ensaio.



FIGURA 112 – IMAGEM DO TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA DE POSTE PRODUZIDO COM ADIÇÃO DE FC NA FÁBRICA DE ARTEFATOS DE CONCRETO BARBOSA & BARBOSA, BAHIA

Estes resultados atestam a possibilidade de utilização das misturas para a produção de artefatos de concreto.

4.4 ANÁLISE AMBIENTAL

Cenário da indústria cimentícia. As estimativas de produção de cimento, para as próximas décadas, apontam para um elevado crescimento, como já mencionado. Como consequência, isto indica aumento no consumo de cimento, de energia, de emissões de CO₂ e na demanda de transporte para escoar a produção, além da necessidade de instalação de novas unidades industriais pela dificuldade de manter as fontes de matérias-primas necessárias para a fabricação do cimento.

A produção de cimento é um processo altamente energético, sendo que esta energia representa de 20 a 40% do custo de produção do cimento. A maior parte da energia é consumida no aquecimento dos fornos e na moagem das matérias-primas e do cimento. Segundo a “International Energy Agency (2007)”, a estimativa média de consumo de energia térmica para a produção do clínquer é de 4,4 GJ/t, enquanto o consumo de energia elétrica é de 111 kWh/t. As previsões das indústrias cimenteiras para 2050 apontam uma redução de no máximo 27,3% para a energia térmica e 17,1% para a energia elétrica.

Outro impacto que o consumo de cimento causa é o aquecimento global, ocasionado pelas emissões de CO₂. Estas, na produção de cimento, ocorrem na etapa de calcinação entre 700 e 900 °C e, durante a obtenção do clínquer pela combustão de combustível no aquecimento dos fornos até a temperatura de 1450 °C. Os valores das emissões de CO₂ variam entre 50 e 60% para a decomposição do calcário e entre 40 e 50% devido a queima de combustível, segundo vários pesquisadores (Müller & Harnisch, 2008; IEA, 2008; BERNSTEIN *et al.*, 2008; CSI, 2009b).

O teor de clínquer no cimento depende do tipo de cimento, o que possibilita uma larga variação na emissão de CO₂ durante a produção de cimento. Além disso, o tipo de processo de produção e sua eficiência, assim como o tipo de energia utilizada, propiciam emissões de CO₂ entre 824 e 1152 kg/ton de clínquer produzido (Yamamoto *et al.*, 1997).

De acordo com a CSI (2009c), a estimativa máxima de emissões de CO₂ para o ano de 2050 é de 693 kg/ton de cimento, o que deve gerar até 2800 milhões de toneladas de CO₂ anualmente, considerando condições de produção (tecnologia e processos) similares aos atuais. Isto representa uma taxa máxima de utilização de clínquer de 70%. A redução de emissões de CO₂ pode ocorrer com a utilização de menores teores de clínquer no cimento, substituindo por mais adições, combustíveis alternativos como biocombustíveis e resíduos, e maior eficiência energética (DAMINELI *et al.*, 2010).

Metha (2008) comentando sobre o tema da sustentabilidade sugeriu reduções em três patamares na indústria da construção com concreto, possibilitando a redução de emissões de CO₂, que são: menor consumo de concreto nas estruturas, menor consumo de cimento no concreto e menor consumo de clínquer no cimento. Isto propiciaria uma redução de 40 a 50% no consumo de clínquer, no entanto, estas ações envolvem inovações arquitetônicas, redução de secções estruturais, cálculo estrutural mais refinado, concreto mais durável, avaliação da resistência do concreto em idade mais avançada, uso de aditivos químicos plastificantes, otimização de tamanho e graduação de agregados e substituição de clínquer por adições minerais em proporções de até 70%, entre outros, que são gradativas.

A redução do consumo de cimento é justificada por questões ambientais, técnicas e econômicas, além de sustentabilidade e viabilidade do negócio de cimento, no que tange a concessão e exploração de novas jazidas de matérias-primas, a demanda energética e o frete rodoviário.

O Brasil apresenta abundância e diversidade de cultivos vegetais, que produzem diferentes fibras, entre elas, as de coco e sisal. Estas possibilitam a aplicação em elementos da construção civil, propiciando melhores características físicas e mecânicas, e assim, obtém-se um melhor desempenho das estruturas.

A utilização das matérias-primas investigadas nesta pesquisa na produção de concretos possibilita uma redução na poluição ambiental.

Considerando que, para a fabricação de 1 t de cimento se produz, entre outros poluentes, principalmente, 0,8 t de CO₂, qualquer redução neste consumo, implica em ganhos substanciais para a qualidade de vida.

Das dosagens de concreto identificadas nesta pesquisa com melhor desempenho, para cada uma das adições, tem-se a como premissa a seguinte redução de consumo de cimento:

Concreto reforçado com fibras de coco. A adição de 0,8% de FC em volume de concreto propiciou uma redução de consumo de cimento de 1,7%, o que corresponde a uma redução de 5,7 kg de CO_2/m^3 de concreto produzido, como comentado anteriormente.

A estrutura do coco é formada pelas camadas epicarpo, mesocarpo, endocarpo e semente; sendo a fibra o material constituinte do mesocarpo. A obtenção das fibras de coco envolve primeiramente a separação da casca, após o maceramento, e em seguida, o desfibramento das FC. Nenhuma agressão ao meio ambiente é verificada.

Como a adição das fibras foi feita em relação ao volume de concreto, também ocorreu uma redução dos agregados. Neste caso, 1,6% de agregado miúdo, e de 1,8% de agregado graúdo. Isto pode propiciar a preservação de recursos naturais, no que tange as jazidas naturais de areia e brita.

Em termos da produção de artefatos de concreto para o setor elétrico, isto corresponde a uma redução de quase 800 kg de cimento e 570 kg de CO_2 por km de linha de distribuição e transmissão, quando da utilização de dosagens de concreto com 0,8% de FC. Da mesma forma, considerando as barragens de usinas hidroelétricas, o valor de redução é de 17 t de cimento e 13,6 t de emissões a menos de CO_2 por cada MW instalado.

Concreto reforçado com fibras de sisal. Para os concretos produzidos com 0,8% de FS em volume de concreto, a redução do consumo de cimento foi de 4,3%, o que representa uma redução estimada na emissão de cerca de 15 kg de CO_2/m^3 de concreto produzido.

A redução de agregados nestas dosagens foi de 4,3 e 4,2%, respectivamente, agregado miúdo e graúdo; o que sugere a preservação de recursos naturais para gerações futuras.

As FS produzem pouco impacto ambiental por serem biodegradáveis; as fibras sintéticas demoram até 150 anos para se decompor no solo, enquanto a FS,

em meses, torna-se um fertilizante natural. Sua forma de obtenção não gera resíduos nocivos ao homem.

Da mesma forma que para a FC, a FS reduziria a produção de 1,8 t e 43 t de cimento, e a emissão de 1,4 t e 34,4 t de CO₂, respectivamente, por km de linha de distribuição e transmissão e para cada MW instalado na construção de barragens de usinas hidroelétricas, considerando um concreto com adição de 0,8% de FS.

Concreto com adição de cinza de coco. Esta matéria-prima foi obtida a partir da casca de coco verde, o qual apresenta alguns destinos diferentes. O coco verde é utilizado na obtenção de coco ralado, leite de coco e água de coco verde, além de serem comercializados os frutos verdes e secos. Desta forma, na sua maioria, aproveitam somente a água e a polpa do coco, o que resulta no descarte incorreto das cascas em aterros sanitários ou até nos rios. Portanto, em primeiro lugar, este é o grande benefício ao meio ambiente e ao homem, a sua utilização; seja por aumentar a vida útil dos aterros sanitários e reduzir a proliferação de vetores de doenças, melhorando a saúde pública; seja na preservação das florestas como alternativa para fornecimento de energia, ou mesmo agregar valor como incremento na cadeia produtiva do coco verde e gerar emprego e renda para uma classe social menos favorecida.

Os resíduos do coco verde quando dispostos em lixões ou aterros sanitários passam pelo processo de decomposição anaeróbico, que é um processo biológico e fermentativo, em que microrganismos degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo um gás que contém, principalmente, metano (CH₄) e dióxido de carbono. O CO₂ é o principal gás responsável pelo efeito estufa, no entanto, o CH₄, com menor concentração, tem potencial de aquecimento 21 vezes superior.

Já existem tecnologias que captam, purificam e queimam o CH₄, com o intuito de reduzir a emissão deste para a atmosfera. A queima do biogás também emite CO₂, porém este é menos nocivo. Da mesma forma, a queima das cascas de coco verde, aqui estudadas, emitem CO₂, o que é prejudicial à saúde. No entanto, estas cascas podem ser matéria-prima alternativa para a produção de energia de diferentes indústrias, como a da cerâmica vermelha e a de revestimento cerâmico.

Os concretos produzidos com 3% de CC, em substituição ao cimento, propiciaram uma redução do consumo de cimento de 3,3%, o que representa uma redução na emissão de 11,2 kg de CO₂/m³ de concreto produzido.

A redução de agregados nestas dosagens foi de 0,2% para o miúdo e de 0,3% para o graúdo. Anualmente, a utilização de CC propiciaria a redução de 1,4 t de cimento e a emissão de 1,1 t de CO₂ por km de linha de distribuição e transmissão. Da mesma forma, estes valores atingiriam 33 t de cimento e 26,4 t de CO₂, quando da construção de barragens para cada MW instalado, utilizando um concreto com adição de 3% de CC.

Concreto com pintura a base de TiO₂. Este tipo de concreto não reduz o consumo de cimento, ao contrário, a camada superficial fotocatalítica também contém cimento, principal emissor de CO₂. No entanto, ambientalmente, este concreto propicia uma melhor qualidade do ar, mitigando a ação de dois outros gases, NO_x e SO₂, também prejudiciais ao ser humano.

Assim, como contribuição ambiental salienta-se a preservação do meio ambiente quanto à redução de ocupação dos aterros sanitários, a não emissão de metano para a atmosfera, a redução de doenças causadas com a proliferação de vetores, a não disposição destes resíduos em áreas urbanas, de praias ou encostas, reduzindo a poluição visual e o mau cheiro, assim como a preservação de recursos naturais para gerações futuras.

Como contribuição econômica, a redução de gastos com a coleta e disposição final do resíduo do coco verde, além do custo final do concreto, pela adição de fibras, as quais apresentam menor custo do que o cimento.

A contribuição social está relacionada ao aproveitamento de mão-de-obra para coletar os resíduos de coco, e também para obter as fibras de coco e sisal, já que estas são produzidas em comunidades carentes, o que proporciona uma renda ou aumento desta para quem produz, propiciando assim, uma melhor qualidade de vida.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, os materiais cimentícios (argamassas e concretos) desenvolvidos com adições (nano-TiO₂, cinza de casca de coco verde, fibras naturais de coco e sisal) propiciaram redução do impacto ambiental, atendendo requisitos físicos, químicos e mecânicos, com características comparáveis a um concreto convencional (sem adições).

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir:

- O concreto reforçado com as fibras naturais à base de sisal possibilitou a sua conformação em até 0,8%, em volume de concreto. Uma desvantagem observada foi devido ao aumento do tempo de pega, resultante do alto teor de açúcares na matriz. Porém, o valor da resistência à compressão axial foi 9,8% superior ao concreto REF, aos 91 dias.
- As fibras naturais à base de coco utilizadas na proporção de 0,8% em volume de concreto produziram aumento na resistência mecânica à compressão axial de 4,8% superior ao REF aos 28 dias. A sua utilização propiciou a redução de 1,7% no consumo de cimento.
- A constituição química da cinza de casca de coco verde e sua cristalinidade não resultaram em material pozolânico. Seu uso na dosagem de concreto contribuiu como efeito “filler”, com pouca alteração no desempenho em relação à dosagem referência.
- A argamassa fotocatalítica desenvolvida como revestimento superficial das estruturas de concreto resultou na diminuição de gases poluentes em até 45%, em ppm, de NO_x e de SO_x, e possibilitou identificar a atividade fotocatalítica presente após período superior a um ano.
- Não foi observada melhoria significativa no comportamento quanto à corrosão dos concretos com adições comparativamente ao REF, sob envelhecimento acelerado em ambiente marinho e industrial até 560 dias, pelas características microestrutural e mineralógica das adições.

- Os tipos de corrosão identificados para os concretos envelhecidos em câmara de névoa salina e de SO_2 foram corrosão generalizada irregular e corrosão localizada, respectivamente. Os produtos de corrosão formados no aço apresentaram morfologias de magnetita, lepidocrocita, goetita e akaganeita, os quais crescem e se transformam em diferentes fases do elemento Fe com O e H.
- Os artefatos de concreto produzidos com as dosagens de FC, FS e CC atenderam aos requisitos das propriedades físicas e mecânicas, o que possibilita a produção em fábricas de pré-fabricados e a instalação destes elementos em redes de energia elétrica.
- O desenvolvimento dos materiais cimentícios com adições desta pesquisa possibilitou a obtenção de patente e a publicação de artigos científicos em congressos e revistas nacionais e internacionais.

6. TRABALHOS FUTUROS

As cinzas da casca de coco verde obtidas neste trabalho não apresentaram características pozolânicas. Uma proposta para trabalhos futuros é a verificação desta característica na cinza obtida pela queima da folha e do caule do coqueiro.

O tratamento de alcalinização aplicado nesta pesquisa para as fibras, não identificou melhorias físicas e mecânicas significativas no concreto. Tem-se como sugestão a aplicação de outras técnicas de limpeza/modificação de fibras para verificação e obtenção de uma melhor eficiência quando da utilização em produtos cimentícios.

A técnica de potencial de corrosão indica somente a probabilidade de ocorrência de corrosão no material. Uma das possibilidades de continuidade desta pesquisa é a utilização de uma técnica mais completa para avaliação da corrosão nos materiais cimentícios desenvolvidos, como a espectroscopia de impedância eletroquímica, que possibilita a medição da resistência de polarização, assim como o acompanhamento dos processos físicos e a avaliação da interface aço/concreto.

Julga-se importante, também, envelhecimento por um período mais longo (além dos 700 dias) dos CPs de concreto armado com adições em câmaras de névoa salina e de SO_2 , com acompanhamento dos produtos de corrosão do aço ao longo do tempo e a determinação da concentração limite de íons agressivos de cloreto e sulfato para a manutenção da qualidade do concreto armado.

Em relação aos testes fotocatalíticos, sugere-se a aplicação da técnica em uma área experimental maior em ambiente urbano (rua ou túnel) para monitorar a eficiência dessa tecnologia em campo frente aos gases poluentes NO_x e SO_2 , além de verificar a durabilidade e a resistência ao desgaste das camadas fotocatalíticas.

7. REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 527-536, 2005.

AHMAD, S. Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 459-471, 2003.

ALI, M.; LIU, A.; SOU, H.; CHOUW, N. Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 30, p.814-825, 2012.

ALMUSALLAM, A. A. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 353-361, 2001.

AMBIENTE BRASIL. Ambiente Resíduos – esquema da estrutura do coco verde. Disponível em: http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/programa_e_projetos/projeto_coco_verde.html. Acesso em: 07/11/2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 201. **Guide to Durable Concrete**. Michigan: Farmington Hills, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual Book of ASTM Standards. **ASTM B 117**: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. USA, 2011.

_____. Annual Book of ASTM Standards. **ASTM C 876**: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. USA, 2009.

_____. Annual Book of ASTM Standards. **ASTM C 1138M**: Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method). USA, 2012.

_____. Annual Book of ASTM Standards. **ASTM D 2320**: Standard test method for density (relative density) of solid pitch (picnometer method). USA, 2012.

_____. Annual Book of ASTM Standards. **ASTM G 87**: Standard Practice for Conducting Moist SO₂ Tests. USA, 2007.

ANDRADE, W. P.; FONTOURA, J. T.; GUERRA, E. A.; BITTENCOURT, R. M. Um método de dosagens para concreto massa. São Paulo, IBRACON, 1981.

ANTUNES, R. A.; COSTA, I; FARIA, D. L. A. Characterisation of corrosion products formed on steels in the first months of atmospheric exposure. **Materials Research**, v.6, p.403-408, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5751**: Materiais pozzolânicos - Determinação de atividade pozzolânica - Índice de atividade pozzolânica com cal. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5752**: Materiais pozzolânicos - Determinação de atividade pozzolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozzolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6210**: Corrosão atmosférica - Materiais metálicos - Preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 7218**: Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8451-1**: Postes de concreto armado e protendido para redes de distribuição e de transmissão de energia elétrica Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10786**: Concreto endurecido — Determinação do coeficiente de permeabilidade à água. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11582**: Cimento Portland — Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12142:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 12826:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993.

_____. **NBR 14656:** Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 15845:** Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Anexo H: Resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 13:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 22:** Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 23:** Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 43:** Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BALLARI, M. M.; HUNGER, M.; SKEN, G. H.; BROUWERS, H. J. H. NO_x photocatalytic degradation employing concrete pavement containing titanium dioxide. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.95, p.245-254, 2010.

BARTOLO-PEREZ, P.; PEÑA, J. L.; SALAS, F. H.; WHEAT, H. G.; HERNÁNDEZ-DUQUE, G. Corrosion of reinforced steel bars embedded in concrete: a study of electrochemical and surface analysis. **Corrosion Reviews**, v. 18, p. 255- 266, 2000.

BALTRUSAITIS, J.; JAYAWEERA, P. M.; GRASSIAN, V. H. Sulfur dioxide adsorption on TiO₂ nanoparticles: Influence of particle size, coadsorbates, sample pretreatment, and light on surface speciation and surface coverage. **J. Phys. Chem. C**, v. 115, p. 492–500, 2011.

BELAADI, A.; BEZAZI, A.; BOURCHAK, M.; SCARPA, F. Tensile static and fatigue behavior of sisal fibres. **Materials and Design**, v. 46, p.76-83, 2013.

BELLMANN, F.; ERFURT, W.; LUDWIG, H. –M. Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p.86-93, 2012.

BENTO, A. T. T. M.; YANO, C. M.; MAZON, L. L.; OLIVEIRA, M. J. E. Aproveitamento da fibra de coco como adição em concreto não estrutural e suas vantagens em relação ao meio ambiente. In: 16º Simpósio Internacional de Iniciação Científica (SIICUSP), São Paulo, 2008.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, p.221-274, 1999.

BOSCHI, A. O.; MELCHIADES, F. G.; ALVES, H. J.; DE BRITO, H. B. Consumption of Thermal Energy in the Manufacture of Ceramic Tiles in Brazil **International Ceramic Review**, v. 60, p. 134-138, 2011.

BRAMBILLA, K. J. C.; PORTELLA, K. F.; CABUSSÚ, M. S.; PEREIRA, P. A. M.; CERQUEIRA, D. P.; LACERDA, L. A. Modelagem da taxa de corrosão do alumínio, aço carbono, aço galvanizado e cobre da região metropolitana de Salvador utilizando redes neurais artificiais. In: Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos - COTEQ, 11º, 2011, Porto de Galinhas.

CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1997.

CHEN, H.; NANAYAKKARA, C. E.; GRASSIAN, V. H. Titanium dioxide photocatalysis in atmospheric chemistry. **Chemical Reviews**, v. 112, p.5919-5948, 2012.

CHEN, J.; POON, C. Photocatalytic construction and building materials: from fundamentals to applications. **Building and Environment**, v.44, pp.1899-1906, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Sisal – safra 2012/2013: comercialização – proposta de ações**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/.../12_10_29_11_45_31_sisal2012.pdf. Acesso em: 07/04/2013.

Construction Specification Institute - CSI. **Recycling Concrete**. World Business Council for Sustainable Development. Suíça, 2009a. 40p.

Construction Specification Institute - CSI. **Cement industry energy and CO₂ performance**. World Business Council for Sustainable Development. Suíça, 2009b 43p.

Construction Specification Institute - CSI. **Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050**. World Business Council for Sustainable Development. Suíça, 2009c. 33p.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v.32, p.555-562, 2010.

DEMEESTERE, K.; DEWULF, J.; DE WITTE, B.; BEELDENS, A.; LANGENHOVE, H. V. Heterogeneous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with TiO₂. **Building and Environment**, v. 43, p.406-414, 2008.

DEPARTAMENTO DE TRÂNSITO DO ESTADO DO PARANÁ – DETRAN-PR. **Anuário estatístico 2012**. Curitiba, 2013.

DIAMANTI, M. V.; ORMELLESE, M.; PEDEFERRI, M. P. Characterization of photocatalytic and superhydrophilic properties of mortars containing titanium dioxide. **Cement and Concrete Research**, v.38, p.1349–1353, 2008.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008. 160p.

DOTTO, J. M. R. **Corrosão do aço induzida por íons cloreto – uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. 331p.

DU, J.; CHEN, W.; ZHANG, C.; LIU, Y.; ZHAO, C.; DAI, Y. Hydrothermal synthesis of porous TiO₂ microspheres and their photocatalytic degradation of gaseous benzene. **Chemical Engineering Journal**, v. 170, p.53-58, 2011.

DUFFÓ, G. S.; MORRIS, W.; RASPINI, I.; SARAGOVÍ, C. A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years. **Corrosion Science**, v. 46, p. 2143-2157, 2004.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com Fibras. In: Isaia, G. C (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed., v. II. São Paulo: Ed. IBRACON, 2011. p.1327-1365.

IORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites. **Composites Part B**, v. 68, p.14-24, 2015.

FORD, S. J.; SHANE, J. D.; MASON, T. O. Assignment of features in impedance spectra of the cement-paste/steel system. **Cement and Concrete Research**, v.28, p.1737-1751, 1998.

FROLLINI, E.; PAIVA, J. M. F.; TRINDADE, W. G.; RAZERA, I. A. T.; TITA, S. P. Plastics and Composites from lignophenols. In: Wallenberger, F. T. & Weston, N. (Ed.). **Natural Fibers, Plastics and Composites**. USA: Kluwer Academic Publishers, 2004. p.193-226.

GASTALDINI, A. L. G.; ISAIA, C. I. Porosidade das pastas compostas de misturas binárias e ternárias de adições minerais. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, VII, 1998, Florianópolis.

GIROTO, J. A.; GUARDANI, R.; TEIXEIRA, A. C. S. C.; NASCIMENTO, C. A. O. Study on the Photo-Fenton Degradation of Polyvinil Alcohol in Solution. **Chemical Engineering and Processing**, v. 45, p.523-532, 2006.

GROUP ITALCEMENTI. Disponível em: www.italcementi.it, acessado em 12/08/2013.

GU, H. Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. **Materials and Design**, v. 30, p.3931–3934, 2009.

GUROL, M. D. **Photo-catalytic construction materials and reduction in air pollutants**. Relatório técnico. San Diego: San Diego State University, 2006.

HERRMANN, J. M. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. **Catalysis Today**, v.53, p.115-129, 1999.

HÜSKEN, G.; HUNGER, M.; BROUWERS, H. J. H. Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. **Building and Environment**, v. 44, p.2463-2474, 2009.

HÜTTERMANN, A.; MAI, C.; KHARAZIPOUR, A. Modification of lignin for the production of new compounded materials. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 55, p.387-394, 2001.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. Relatório Anual da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba Ano de 2012. Curitiba, 2013.

International Energy Agency - IEA. World Business Council for Sustainable Development. **Cement Technology Roadmap**. Carbon Emissions Reductions up to 2050. Paris, 2009.

International Energy Agency - IEA. Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ emissions. Paris, 2007.

JAUL, W.-C.; TSAY, D.-S. A study of the basic engineering properties of slag cement concrete and its resistance to seawater corrosion. **Cement and Concrete Research**, v. 28, p. 1363–1371, 1998.

JIN, R.; WU, Z.; LIU, Y.; JIANG, B.; WANG, H. Photocatalytic reduction of NO with NH₃ using Si-doped TiO₂ prepared by hydrothermal method. **Journal of Hazardous Materials**, v. 161, p.42–48, 2009.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. G. Cinzas vegetais e aglomerantes alternativos. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Campinas: Ed. da UNICAMP, p. 140, 2003.

JOHN, V.; CINCOTTO, M.; SJÖSTRÖM, C.; AGOPYAN, V.; OLIVEIRA, C. T. A. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p.565-574, 2005.

JOUKOSKI, A.; PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; SALES, A.; DE PAULA, J. F. Estudo do processo de fabricação de postes de concreto armado destinados a redes de distribuição elétrica: principais falhas, suas conseqüências e correções. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 44., 2002, Belo Horizonte.

KOLEVA, D. A.; BREUGEL, K.; WIT, J. H. W.; WESTING, E.; COPUROGLU, O.; VELEVA, L.; FRAAIJ, A. L. A. Correlation of microstructure, electrical properties and electrochemical phenomena in reinforced mortar. Breakdown to multi-phase interface structures. Part I: Microstructural observations and electrical properties. **Materials Characterization**, v. 59, p.290-300, 2008.

KÄMPF, A. N.; FERMINO, M. H. Substratos para plantas: a base da produção vegetal em recipientes. In: Encontro Nacional sobre Substrato para Plantas, 1º, 1999, Porto Alegre.

KANNING, R. C. **Avaliação do potencial pozolânico da cinza de folha de bananeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. 69p.

KANNING, R. C.; PORTELLA, K. F.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; BONATO, M. M.; SANTOS, J. C. M. Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 460-465, 2014.

KHEDARI, J.; WATSANASATHAPORN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil–cement block with low thermal conductivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 1, p.111-116, 2005.

KURUVILLA, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; BEENA, J.; SABU, T.; CARVALHO, L. H. A Review on Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, p.367-379, 1999.

LI, Y.; MAI, Y. W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science Technology**, v. 60, p.2037-2055, 2000.

LI, Y.; PICKERING, K. L.; FARRELL, R. L. Analysis of green hemp fibre reinforced composites using bag retting and white rot fungal treatments. **Industrial Crops and Products**, v. 29, p.420-426, 2009.

LI, Z.; WANG, X.; WANG, L. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. **Composites Part A**, v. 37, p.497-505, 2006.

LIMA, M. G. Ações do meio ambiente sobre as estruturas de concreto. In: Isaia, G. C (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed., v. II. São Paulo: Ed. IBRACON, 2011. p.733-772.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; NAGAHAMA, K. J.; FAIRBAIRN, E. M. Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p.644-651, 2007.

LINSEBIGLER, A. L.; LU, G.; YATES JR., J. T. Photocatalysis on TiO₂ Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. **Chemical Reviews**, v. 95, p.735-758, 1995.

LITTER, M. I. Heterogeneous photocatalysis: Transition metal ions in photocatalytic systems. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.23, p.89-114, 1999.

LOVEIRA, E. L.; FIOL, P. S.; SENN, A.; CURUTCHET, G.; CANDAL, R.; LITTER, M. I. TiO₂-photocatalytic treatment coupled with biological systems for the elimination of benzalkonium chloride in water. **Separation and Purification Technology**, v. 91, p.108-116, 2012.

MACDONALD, J. R. Impedance Spectroscopy. **Annals of Biomedical Engineering**, v. 20, pp. 289-305, 1992.

MAGGOS, T.; PLASSAIS, A.; BARTZIS, J. G.; VASILAKOS, C.; MOUSSIOPOULOS, N.; BONAFIOUS. Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 136, p.35-44, 2008.

MANNAN, M. A.; GANAPATHY, C. Concrete from an agricultural waste-oil palm shell (OPS). **Building and Environment**, v. 39, p.441-448, 2004.

MARTIN, A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, p.40-46, 2009.

MARTÍNEZ, I.; ANDRADE, C. Application of EIS to cathodically protected steel: Tests in sodium chloride solution and in chloride contaminated concrete. **Corrosion Science**, v. 50, p. 2948-2958, 2008.

MATTOSO, L. H. C.; FERREIRA, F. C.; CURVELO, A. S. Sisal Fiber: Morphology and applications in polymer composites. In: LEÃO, A. L.; CARVALHO, F. X.; FROLLINI, E. **Lignocellulosic-plastics composites**. São Paulo: USP; Botucatu: UNESP, p. 241-266, 1997.

MEDINA, J. C. **O sisal**. São Paulo: Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 1954.

MEDINA, J. C. **Plantas fibrosas da flora mundial**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1959.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento de peças pré-moldadas de concreto fotocatalíticas para pavimentação e purificação do ar**. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO_x). **Building and Environment**, v.49, pp.117-123, 2012.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G.; GLEIZE, P. J. P.; VILLENA, J. Development and evaluation of the efficiency of Photocatalytic pavement blocks in the laboratory and after one year in the field. **Construction and Building Materials**, v.37, pp.310-319, 2012.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. L. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MILANI, A. P. S; BERTOCINI, S. R.; ARAÚJO, S. C.; SANTOS, V. P. R.; GOMES, T. Avaliação físico-mecânica de argamassas adicionadas de cinza de casca de coco verde. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51., 2009, Curitiba.

MISHRA, S.; MOHANTY, A. K.; DRZAL, L. T.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. A Review on Pineapple Leaf Fibers, Sisal Fibers and Their Biocomposites. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 289, p.955-974, 2004.

MOSLEMI, A. A. Emerging technologies in mineral-bonded wood and fiber composites. **Advanced Performance Materials**, v.6, p. 161-179, 1999.

MULINARI, D. R.; BAPTISTA, C. A. R. P.; SOUZA, J. V. C.; VOORWALD, H. J. C. Mechanical properties of coconut fibers reinforced polyester composites. **Engineering Procedia**, v.10, p.2074-2079, 2011.

MÜLLER, N.; HARNISCH, J. **A blueprint for a climate friendly cement industry**. Gland/Switzerland: WWF International, 2008. 16p.

MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 84, p. 2222-2234, 2002.

NAGEL-HASSEMER, M. E.; CORAL, L. A.; LAPOLLI, F. R. Processo UV/H₂O₂ como pós-tratamento para remoção de cor e polimento final em efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 35, p.900-904, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2ª edição. São Paulo: Editora PINI, 1997.

NOGUEIRA, L. A. H. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Editora ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000. 144 p.

NOGUEIRA, R. F. P.; JARDIM, W. A Fotocatálise Heterogênea e sua Aplicação Ambiental. **Química Nova**, v. 21, p. 69-72, 1998.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P. Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland em argamassas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p. 490–496, 2006.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction and Building Materials**, v. 25, p.575-581, 2011.

PAL, S. C.; MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. Corrosion behavior of reinforcement in slag concrete. **ACI Mater**, v. 99, p. 1– 7, 2002.

PARAMASIVAM, P.; NATHAN, G. K.; DAS GUPTA, N. C. Coconut fibre reinforced corrugated slabs. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 6, p.19-27, 1984.

PEREIRA, C. L.; SAVASTANO JR., H.; PAYÁ, J.; SANTOS, S. F.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J. Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber. **Industrial Crops and Products**, v. 49, p.88-96, 2013.

POON, C. S.; CHEUNG, E. NO removal efficiency of photocatalytic paving blocks prepared with recycled materials. **Construction and Building Materials**, v. 21, p.1746-1753, 2007.

PRADO, L. P.; CASTRO, J. N. T.; AKASAKI, J. L.; SILVA, E. J. Análise das propriedades do concreto com adição de cinza de casca de arroz sem moer. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51º, 2009, Curitiba.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p.575-582, 2005.

RAMLI, M.; KWAN, W. H.; ABAS, N. F. Strength and durability of coconut-fiber-reinforced concrete in aggressive environments. **Construction and Building Materials**, v. 38, p.554-566, 2013.

RATNA PRASAD, A. V.; MOHANA RAO, K. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites: jowar, sisal and bamboo. **Materials and Design**, v. 32, p.4658-4663, 2011.

REDDY, N.; YANG, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 1, p.22-27, 2005.

REDDY, N.; YANG, Y. Structure and properties of high quality natural cellulose fibers from cornstalks. **Polymer**, v. 46, p.5494-5500, 2005.

RESENDE, F. M.; ROITMAN, N.; TOLEDO FILHO, R. D.; MAGLUTA, C. Dynamic mechanical behavior of normal and high performance concrete reinforced with sisal fiber. In: ASCE Engineering Mechanics Conference, 17th, 2004, Newark.

ROCHA, F. C. **Leituras de potencial de corrosão em estruturas de concreto armado: Influência da relação água/cimento, da temperatura, da contaminação por cloretos, da espessura de cobrimento e do teor de umidade do concreto.** 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

ROSA, M. F.; ABREU, F. A. P.; FURTADO, A. A. L.; BRIGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. V. **Beneficiamento de casca de coco verde.** Disponível em: www.cnpat.embrapa/home/portfolio/tecnologia. Acesso em 30/04/2010.

ROSA, M. F.; ABREU, F. A. P.; FURTADO, A. A. L.; BRÍGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. V. **Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de coco verde.** Comunicado Técnico 61. Fortaleza: Embrapa, 2001.

ROWELL, R. M.; YOUNG, R. A.; ROWELL, J. K. Fiber properties. In: _____. **Paper and Composites from Agro-Based Resources.** New York: Lewis Publishers, 1997. p. 63-134.

SANTIAGO-MORALES, J.; GÓMEZ, M. J.; HERRERA, S.; FERNÁNDEZ-ALBA, A. R.; GARCÍA-CALVO, E.; ROSAL, R. Oxidative and photochemical processes for the removal of galaxolide and tonalide from wastewater. **Water Research**, v. 46, p.4435-4447, 2012.

SARMIENTO, C. R.; FREIRE, W. J. Argamassa de cimento e areia combinada com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.17, p.1-8, 1997.

SAVASTANO, H.; WARDEN, P.; COUTTS, R. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p.379-384, 2000.

SEDAN, D.; PAGNOUX, C.; SMITH, A; CHOTARD, T. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 28, p.183-192, 2008.

SILVA, F. A.; CHAWLA, N.; TOLEDO FILHO, R. D. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. **Composites Science and Tecnology**, v. 68, p.3438-3443, 2008a.

SILVA, I. I. S. A.; LAGO, L. B.; SOARES, J. P.; SOUZA, P. S. L. Avaliação do uso da fibra de coco em compósitos cimentícios. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 50º, 2008b, São Paulo.

SILVA, R. V.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W.; CLARO NETO, S.; CHIERICE, G. O.; TARPANI, J. R. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. **Composites Science and Tecnology**, v. 66, p.1328-1335, 2006.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatório Anual 2012**. Rio de Janeiro, 2013.

SOKOLOVICZ, B. C.; ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. Estudo da viabilidade técnica e econômica da cinza de casca de arroz residual e natural, sem beneficiamento, na produção de concreto estrutural. Estudo de protótipos. Penetração de cloretos. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51º, 2009, Curitiba.

SONG, H. W.; SARASWATHY, V. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – An overview. **Hazardous Materials B**, v. 138, p. 226–233, 2006.

STANCATO, A.; BURKE, A.; BERALDO, A. Mechanism of a vegetable waste composite with polymer-modified cement (VWCPMC). **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p.599-603, 2005.

SUWA, Y.; INAGAKI, M.; NAKA, S. Polymorphic transformation of titanium dioxide by mechanical grinding. **Journal of Materials Science**, v.19, p.1397-1405, 1984.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; SANJUÁN, M. A.; ENGLAND, G. L. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p.537-546, 2005.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p.185-196, 2003.

TOPÇU, I. B.; BOGA, A. R. Effect of ground granulate blast-furnace slag on corrosion performance of steel embedded in concrete. **Materials and Design**, v. 31, p. 3358–3365, 2010.

UMAR, M.; RODDICK, F.; LINHUA, F. Effect of coagulation on treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate by UVC/H₂O₂. **Journal of Hazardous Materials**, v. 266, p.10–18, 2014.

VALADEZ-GONZALEZ, A.; CERVANTES-UC, J. M.; OLAYO, R.; HERRERA-FRANCO, P. J. Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. **Composites Part b: Engineering**, v.30, p.309-320, 1999.

VAN DAM, J. E. G.; VAN DEN OEVER, M. J. A.; TEUNISSEN, W.; KEIJERS, E. R. P.; PERALTA, A. G. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. **Industrial Crops and Products**, v. 19, p.207-216, 2004.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, v.10, p.77-90, 2010.

VERA, R.; VILLARROEL, M.; CARVAJAL, A. M.; VERA, E.; ORTIZ, C. Corrosion products of reinforcement in concrete in marine and industrial environments. **Materials Chemistry and Physics**, v.114, p.467–474, 2009.

VISINESCU, C. M.; SANJINES, R.; LÉVY, F.; PÂRVULESCU, V. I. Photocatalytic degradation of acetone by Ni-doped titania thin films prepared by dc reactive sputtering. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.60, p.155–162, 2005.

WANG, W.; HUANG, G. Characterisation and utilization of natural coconut fibres composites. **Materials and Design**, v.30, p.2741-2744, 2009.

WEI, J.; MEYER, C. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. **Applied Surface Science**, v.289, p.511-523, 2014.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; HENDRIKS, C.; MEIDA, L. O. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. **Annual Review of Energy and the Environment**, v.26, p.303-329, 2001.

YAM, F. K.; BEH, K. P.; NG, S. W.; HASSAN, Z. The effects of morphological changes on the vibrational properties of self-organized TiO₂ nanotubes. **Thin Solid Films**, v.520, p.807-812, 2011.

YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y.; COIMBRA, A. M.; MONTANHEIRO, T. J. Environmental impact reduction on the production of blended Portland cement in Brazil. **Environmental Geosciences**, v.4, p.192-206, 1997.

YEAU, K. Y.; KIM, E. K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1391– 1399, 2005.

ZHAO, J; YANG, X. Photocatalytic oxidation for indoor air purification: a literature review. **Building and Environment**, v. 38, p.645-654, 2003.